

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики

## **CFD-МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАТОРА ОХОЛОДЖЕННЯ РЕА З ТЕПЛОВИМИ ТРУБАМИ**

**Розрахунково-графічна робота з дисципліни**

**«Комп’ютерне моделювання енергетичних процесів і систем»**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра за освітньою  
програмою «Моделювання і комп’ютерні технології в теплофізиці»  
спеціальності 144 «Теплоенергетика» та освітньою програмою  
«Інженерія і комп’ютерні технології теплоенергетичних систем»  
спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»*

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського

2021

CFD-моделювання радіатора охолодження РЕА з тепловими трубами. Розрахунково-графічна робота з дисципліни «Комп'ютерне моделювання енергетичних процесів і систем» [Текст] : навч. посіб. для студентів спеціальності 144 “Теплоенергетика” (освітня програма “Моделювання і комп'ютерні технології в теплофізиці”) та 142 “Енергетичне машинобудування” (освітня програма “Інженерія і комп'ютерні технології теплоенергетичних систем”) / укладач О. В. Баранюк; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 44 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 13.05.2021 р.) за поданням Вченої ради ТЕФ (протокол № 10 від 29.03.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

## **CFD-МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАТОРА ОХОЛОДЖЕННЯ РЕА З ТЕПЛОВИМИ ТРУБАМИ**

**Розрахунково-графічна робота з дисципліни**

**«Комп'ютерне моделювання енергетичних процесів і систем»**

Укладач:	<i>Баранюк Олександр Володимирович, к.т.н., доц. каф. АЕС і</i>
Відповідальний редактор	<i>Козак Д.В., к.т.н., наук. співр. каф. АЕС і ІТФ</i>
Рецензент	<i>Воропаєв Геннадій Олександрович, член-кор НАН України, д-р ф-м. наук, проф., заст., директора ІГМ НАН України</i>
	<i>Середа Володимир Володимирович, доц., к.т.н., доц. каф. ТПТ</i>

*В посібнику викладена послідовність використання програмного комплексу Ansys для моделювання температурних полів, які спостерігаються в радіаторах охолодження радіоелектронної апаратури (РЕА). Метою навчального посібника є формування у студентів знань і умінь виконувати моделювання як стандартних пластинчасто-ребристих радіаторів охолодження РЕА так і їх модифікацій за допомогою сучасних випаровувально-конденсаційних теплообмінних пристроїв – теплових труб.*

*Посібник може бути корисним для наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються дослідженням та розробкою сучасних високоефективних пристроїв охолодження РЕА, де використовуються умови, характерні як для вимушеної так і для вільної конвекції.*

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

## Вступ

CFD-моделювання є невід'ємною частиною конструкторського проектування радіоелектронної апаратури (РЕА) [1-3] і використовується для визначення методів, які здатні забезпечити заданий тепловий режим окремих елементів і складових РЕА.

Найбільш гостро проблема забезпечення теплового режиму виникає при забезпеченні пасивного охолодження силових напівпровідникових пристроїв і комп'ютерної техніки. Тому, важливим кроком при проектуванні систем охолодження РЕА є вибір вже існуючого радіатора або дослідження і розрахунків нового який повинен забезпечити відведення та ефективне розсіювання тепла при мінімальних енергетичних і масо-габаритних показниках пристрою в цілому. Тому метою представленої розрахунково-графічної роботи є формування у студентів знань і умінь виконувати моделювання як стандартних пластинчасто-ребристих радіаторів охолодження РЕА так і їх модифікацій за допомогою сучасних випаровувально-конденсаційних теплообмінних пристроїв – теплових труб.

Для досягнення поставленої мети, в рамках розрахунково-графічної роботи слід розробити CFD-модель течії і теплообміну в радіаторі охолодження РЕА, конструкція якого планує використання теплових труб, засобами програмного комплексу ANSYS-Fluent.

Розрахунково-графічна робота з дисципліни „Комп'ютерне моделювання енергетичних процесів і систем” виконується після того, як студенти отримали практичні навички роботи з програмного комплексу ANSYS-Fluent і засвоїли матеріал теоретичного курсу.

# **1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ**

Метою розрахунково-графічної роботи є формування у студентів знань і умінь виконувати моделювання як стандартних пластинчасто-ребристих радіаторів систем охолодження РЕА так і їх модифікацій за допомогою сучасних випаровувально-конденсаційних теплообмінних пристроїв у вигляді теплових труб.

В якості завдання на розрахунок слід розробити CFD-модель радіатора охолодження РЕА конструкція якого передбачає встановлення теплової труби при заданих теплових і режимних параметрах. Порівняти отримані результати з результатами аналітичного і комп'ютерного розрахунку моделі радіатора такої ж геометрії, але без теплової труби. Розрахунково-графічна робота повинна містити наступні розділи:

- Аналітичний розрахунок теплових характеристик пластинчасто-ребристого радіатора. Мета даного розділу – отримати дані, за допомогою яких буде проводитись верифікація CFD-моделі пластинчасто-ребристого радіатора без теплових труб.
- Методика CFD-моделювання. Розділ повинен містити опис послідовності створення скінчено-елементної моделі пластинчасто-ребристого радіатора з тепловою трубою і без неї та опис математичної моделі для моделювання.
- Обробка результатів досліджень. Розділ повинен містити результат обробки скінчено-елементної моделі у вигляді векторних і контурних полів швидкостей та температур, для порівняння ефективності пластинчасто-ребристого радіатора з тепловою трубою і без неї при однакових теплових і режимних факторах. В якості теплових і режимних факторів слід розуміти потужність, що

виділяється елементом РЕА і швидкість потоку повітря перед радіатором.

- Висновки. Тут в тезисній формі перерахувати, що було зроблено в роботі, привести кількісні результати роботи і надати можливі рекомендації щодо покращення конструкції радіатора.

## **1.1 Завдання на розрахунково-графічну роботу**

Завданням для розрахунково-графічної роботи є розробка CFD-моделі радіатора з пластинчастим ребренням для охолодження РЕА, конструкція якого передбачає встановлення теплової труби (рис. 1.1) для вирівнювання поля температур радіатора. Для порівняння ефективності використання теплової труби слід також провести моделювання стандартного пластинчасто-ребристого радіатора тої ж геометрії, але без теплової труби. Для того, щоб була можливість провести валідацію методики моделювання, паралельно з моделюванням стандартного пластинчасто-ребристого радіатора провести аналітичний розрахунок його теплових характеристик за допомогою відомої методики [1, 4].

Модель складається із радіатора, що виготовлений з алюмінію марки АД31 до якого посередництвом мідних притискної і центрувальної пластин пригвинчений мідний імітатор радіоелектронного пристрою на зовнішній поверхні якого знаходиться джерело теплоти. При проведенні моделювання, врахувати, що між притискними елементами, тепловою трубою і поверхнею радіатора знаходиться шар термопасти. Мета застосування

якого – зменшити термічний опір між контактуючими елементами. Марка термопасті і початкові дані, необхідні для виконання роботи, перераховані в табл. 1.1. Теплофізичні властивості термопаст приведені в доступній літературі [5].

Таблиця 1.1. Вихідні дані

Найменування	Варіант									
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10
Потужність, що виділяється охолоджуючим елементом $Q$ , Вт	170	200	220	160	100	120	130	150	170	180
Температура повітряного потоку $\theta_{\text{пов}}$ , °С	40	30	35	30	40	30	28	35	40	30
Висота ребра радіатора $H$ , мм	155	186	223	234	202	242	290	348	365	190
Товщина основи ребра радіатора $\delta_1$ , мм	2	3	5	2	2,8	3,6	2	2,5	3	6
Товщина торця ребра радіатора $\delta_2$ , мм	1	1,5	2	1,2	1,4	1,8	1	1,3	1,5	3
Крок ребер радіатора $b$ , мм	6	12	18	8	10	14	16	20	7	8
Довжина ребра $L$ , мм	300	200	250	320	280	260	310	350	330	290
Ширина радіатора $B$ , мм										
Товщина основи радіатора $A$ , мм	6	8	5	4	6	8	10	8	6	4
Витрата теплоносія в каналі перед радіатором $D$ , м <sup>3</sup> /с	0,03	0,025	0,035	0,04	0,05	0,035	0,045	0,038	0,05	0,048
Кількість ребер радіатора $z$	6	5	6	6	5	6	6	5	5	6
Ефективна теплопровідність теплової труби $\lambda_{\text{тт}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	8000	10000	40000	15000	20000	60000	35000	70000	13000	25000

Таблиця 1.1. Вихідні дані (продовження)

Найменування	Варіант									
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10
Марка термопаст	Arctic Cooling MX-3	Arctic Silver 5	Zalman ZMSTG 2	Thermalright Chill Factor	OCZ Ultra 5+	Coolaboratory Liquid	ЖМ-6	Thermax	КПТ-8	Thermaltake TG-1

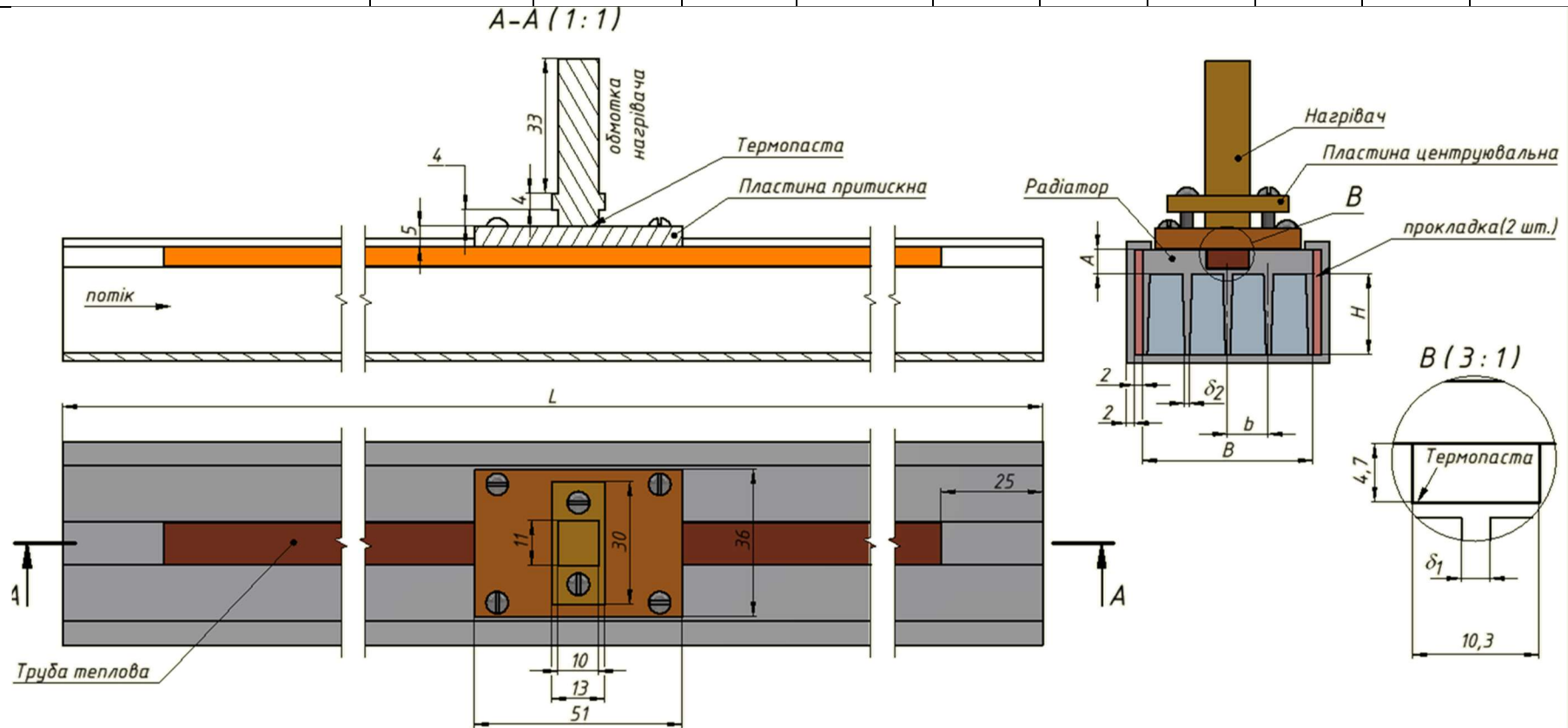


Рис. 1.1. – Модель радіатора з тепловою трубою

## **2 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ**

В даному розділі проводиться аналіз середнього теплообміну і аеродинамічного опору розвинених розрізних поверхонь з плоскою основою, які використовуються в елементах систем охолодження радіоелектронної апаратури (РЕА).

Метою даного розділу є проведення валідації методик числового експерименту, засобами якого проводиться дослідження, щоб в подальшому провести оптимізацію ребреної частини охолоджуючої системи і підвищити ефективність роботи РЕА в цілому.

Приведений нижче аналіз виконувався за допомогою розроблених скінченно-елементних CFD-моделей розвинених розрізних поверхонь з плоскою основою в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent.

### **2.1 Методика CFD-моделювання радіатора**

Геометричну модель радіатора можна побудувати засобами стандартного Design Modeler, який призначений для моделювання геометрії розрахункових об'єктів в комплексі програм ANSYS. Проте, для розширення кола знань студентами конструкторських САПР слід використати для моделювання геометричні редактори SolidWorks, або Autodesk Inventor. Потім, через формати «\*.x\_p» (формат «Parasolid», що використовується при конвертації даних з SolidWorks) або «\*.sat» (у випадку використання Autodesk Inventor) конвертувати модель в ANSYS.



При моделюванні геометрії, що зображена на кресленику (рис. 1.1) потрібно створити власне модель радіатора (рис. 2.1), модель теплової труби, модель центрувальної пластини, імітатора теплонавантаженого елемента з притискною пластиною (рис. 2.4). А також врахувати, що між контактуючими елементами знаходиться шар термопасти (табл. 1.1). Гвинти, які призначені для кріплення згаданих деталей, моделювати не потрібно.

Якщо модель радіатора містить отвори для кріплення гвинтів, то скінченно-елементна сітка будується за допомогою методу «Tetrahedrons» з вказанням відстані між вузлами розрахункової сітки функцією «Size».

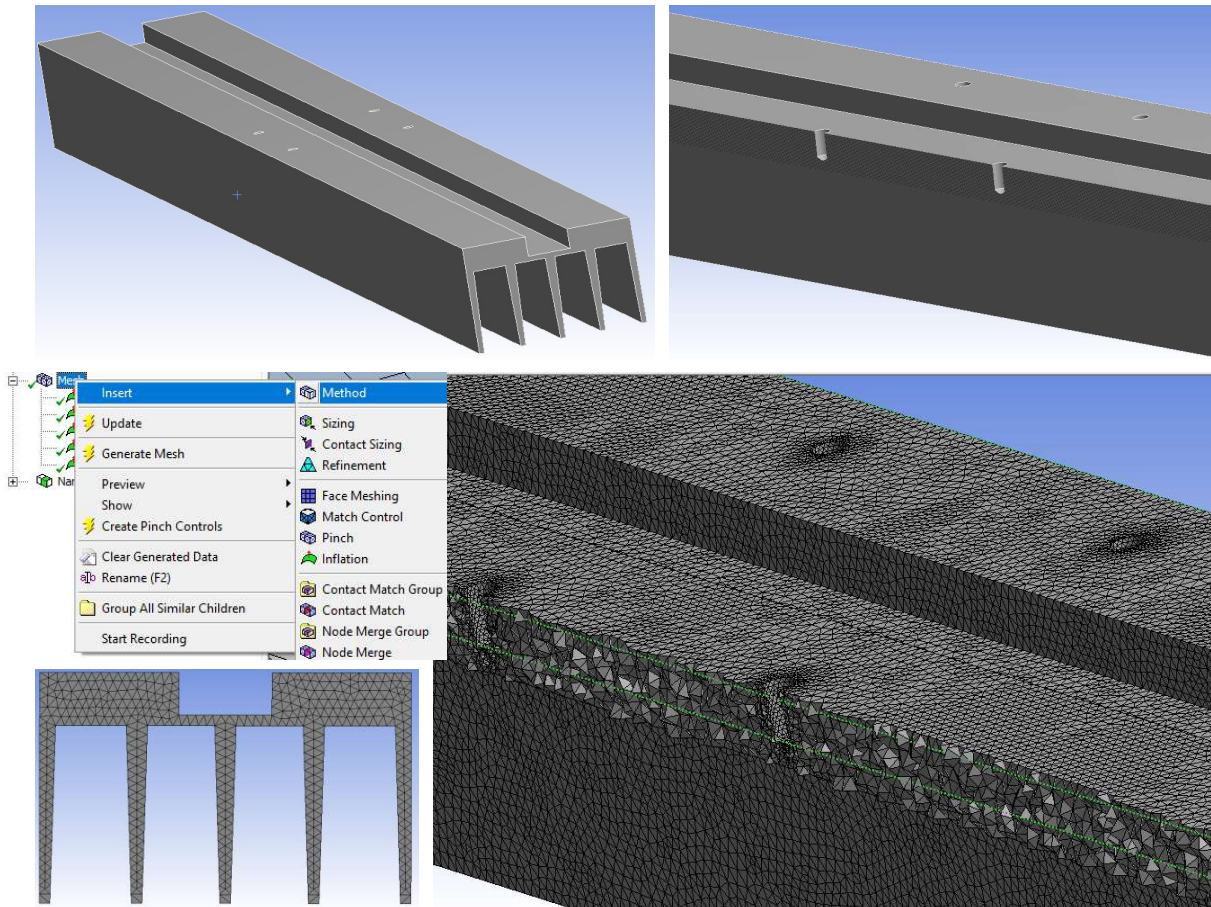


Рис. 2.1. – Зовнішній вигляд (а) і скінчено-елементна сітка радіатора (б)

У іншому випадку, коли не створювали отвори для кріплення гвинтів на етапі геометричного моделювання, можна використати метод «Sweep», тим самим заощадити достатньо пам'яті комп'ютера замінивши скінчено-елементну сітку, для створення якої використовується скінчений елемент у формі тетраедра (метод «Sweep»), скінчено-елементною сіткою, для створення якої використовується скінчений елемент у формі призми (метод «Sweep»).

Ребра радіатора утворюють систему каналів для проходу повітря відокремлених один від одного ребрами. Для створення скінчено-елементної сітки в них слід натиснувши праву кнопку миші на «Mesh» вибрати Insert → Inflation (функція яка відповідає за створення примежового шару на межі тверде тіло – рухома рідина). В якості «Geometry» вибрати плоску поверхню (торець розрахункового об'єму що моделює потік повітря в одному міжреберному каналі). В якості «Boundary» – кромки, що характеризують периметр каналу (рис. 2.2).

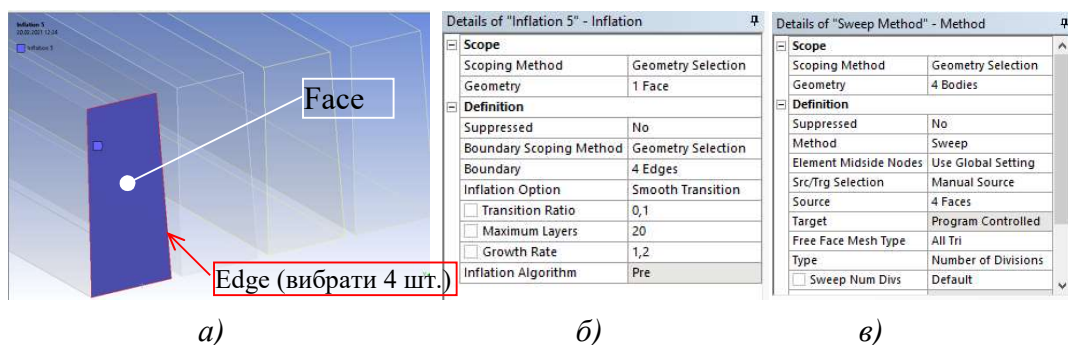


Рис. 2.2. – Необхідні для роботи функції «Inflation» елементи (а) та меню налаштування функцій «Inflation» (б) і «Sweep Method» (в)

Повторити перераховані операції стільки разів, скільки міжреберних каналів задано в завданні (табл. 1.1).

Після цього для створення скінчено-елементної сітки з скінченими елементами у формі призми потрібно на строчці «Mesh»

натиснувши праву кнопку миші на і вибрати Insert → Method → Sweep. Де в якості «Geometry» вибрати розрахункові об'єми що моделюють потік повітря в міжреберних каналах радіатора. Замінити в строчці «Src/Trg Selection» «Automatic» на «Manual Source». Після цього в строчці «Source» (буде підсвічуватись жовтим) вказати на торці розрахункового об'єму, що моделюють потік повітря в міжреберних каналах радіатора (рис. 2.2а). В строчці «Free Face Mesh type» замінити «Quad/Tri» на «All Tri». Це дозволить апроксимувати центральну область каналу (ззовні області примежового шару створеного функцією «Inflation») за допомогою елементарних трикутників. Метод «Sweep» додасть висоту цим елементам і отримаємо скінчений елемент в формі призми. Отже, поблизу стінки скінченні елементи матимуть форму паралелепіпеда, а в центральній області каналу – в формі призми (рис. 2.3а).

Якщо кількість елементів сітки в меню «Statistics» перевищує 8 млн., слід збільшити відстань між вузлами (Min Size, Max Face Size, Max Tet Size) розгорнувши сувій «Sizing» (рис. 2.3б).

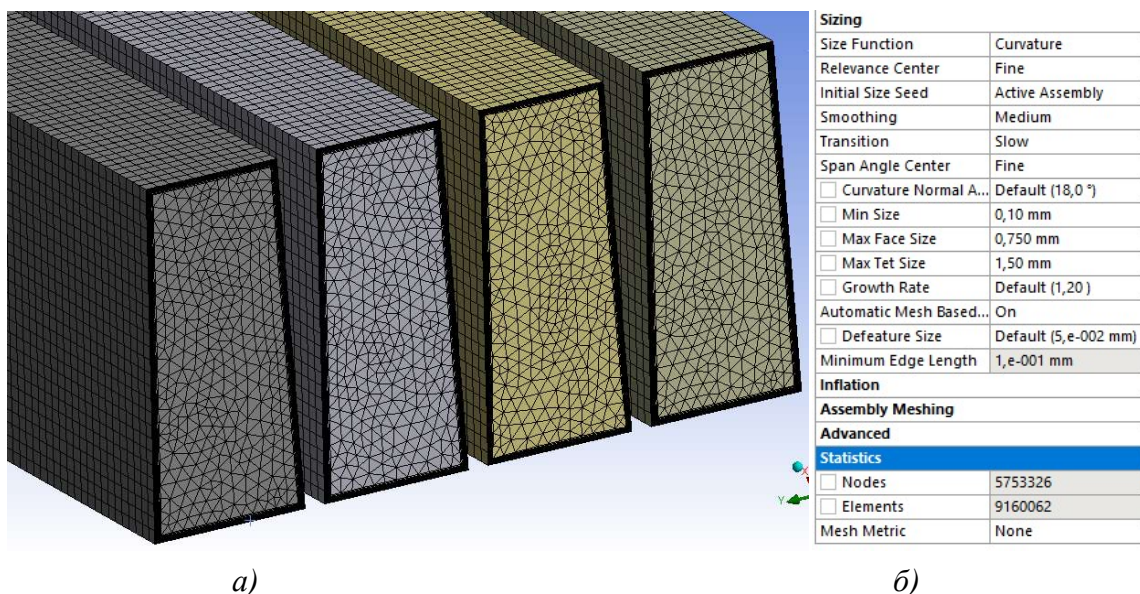


Рис. 2.3. – Зовнішній вигляд скінчено-елементної сітки для потоку повітря в міжреберних каналах радіатора (а) та налаштування сувоїв «Sizing» і «Statistics» (б)



Скінчено-елементна сітка центральної пластини, імітатора теплонавантаженого елемента з притискуною пластиною зображені на рис. 2.4. Відстань між скінченими елементами якої відповідає відстані, що зазначена в глобальних параметрах сувою «Sizing» (визначалась на крокові, коли задавали щільність розрахункової сітки потоку повітря).

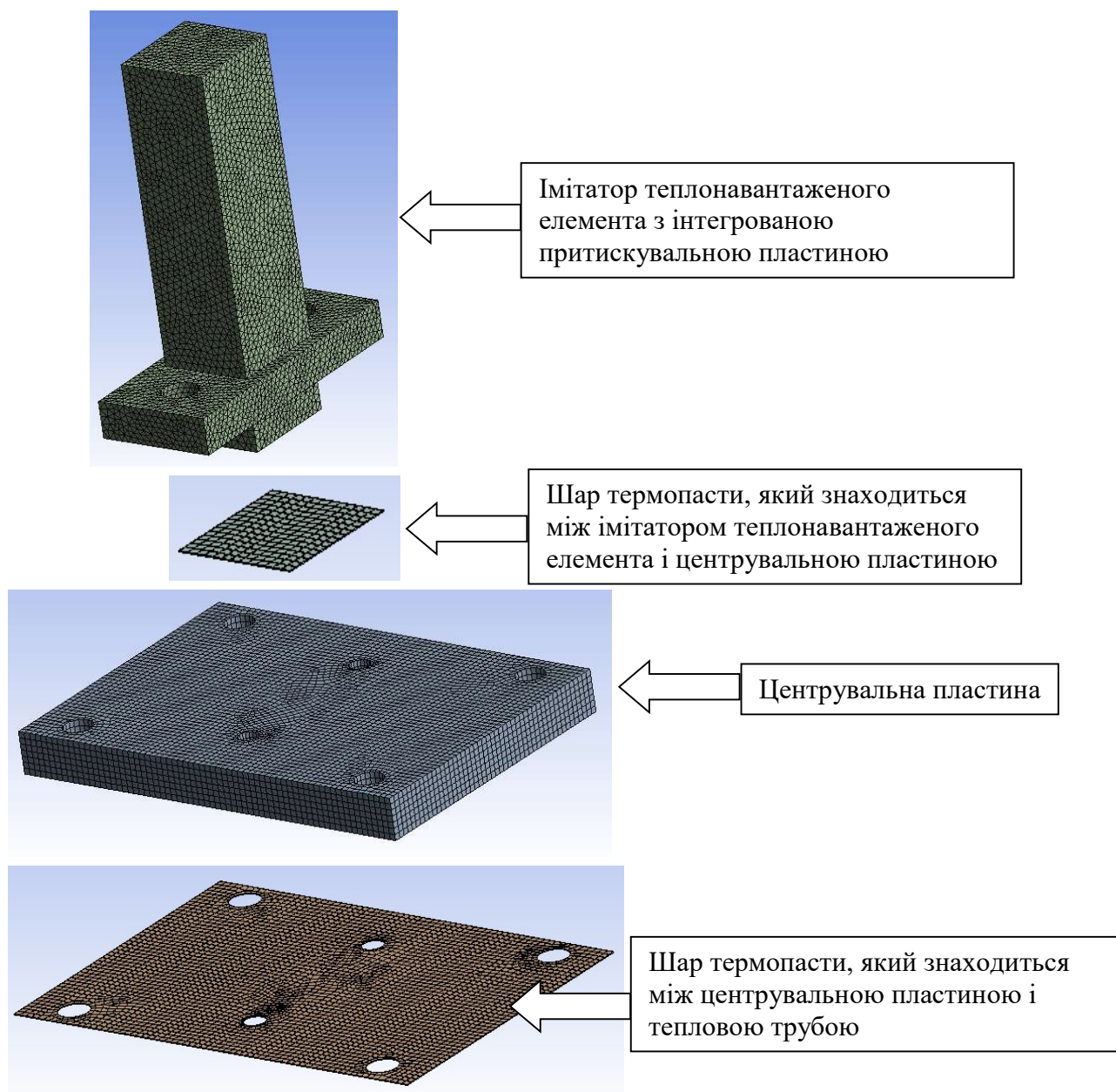
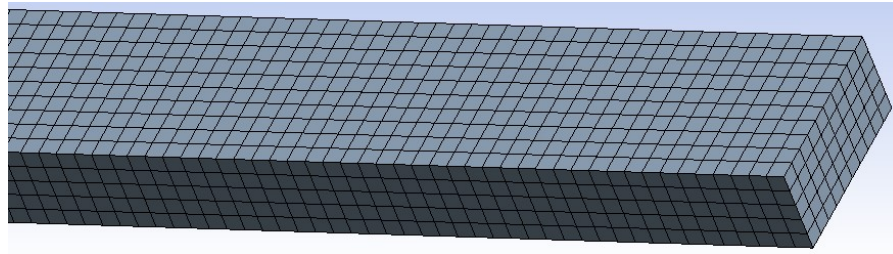
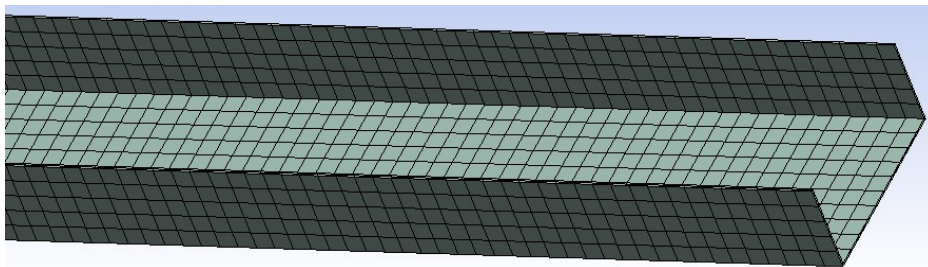


Рис. 2.4. – Вид з «рознесеними частинами» елементів що складають ланцюжок взаємозв'язку «імітатор теплонавантаженого елемента» – «теплова труба»

Скінчено-елементна сітка для теплової труби і шару термопасты, який знаходиться між її зовнішньою поверхнею і поверхнею пазу в радіаторі, у якому вона розташовується, створюється аналогічно (рис. 2.5).



a)



б)

Рис. 2.5. – Вид з «рознесеними частинами» елементів що складають ланцюжок

Наступний, дуже важливий крок – це завдання взаємозв’язків між розрахунковими сітками об’ємів моделі (Manual Contact Region). Взаємозв’язки, що були створені системою автоматично слід видалити і в «ручному» режимі (особисто) створити нові. Для цього на строчці «Connections» натиснути праву кнопку миші вибрати Insert → Manual Contact Region. І послідовно, від межі «імітатор тепло навантаженого елемента – термопаста, яка знаходиться між імітатором теплонавантаженого елемента і центральною пластиною» (рис. 2.6) поєднати контактні грані елементів. Рекомендується поєднання проводити в напрямку поширення теплового потоку. Тобто, якщо теплота поширюється від імітатора теплонавантаженого елемента, через шар термопасты до центральної пластини, далі від центральної пластини до шару

термопасти між нею і тепловою трубою, а далі від теплової труби до радіатора через шар термопасти слід в строчці «Contact Bodies» вказувати грань звідки направляється тепловий потік в сторону грані зазначеної в строчці «Target Bodies».

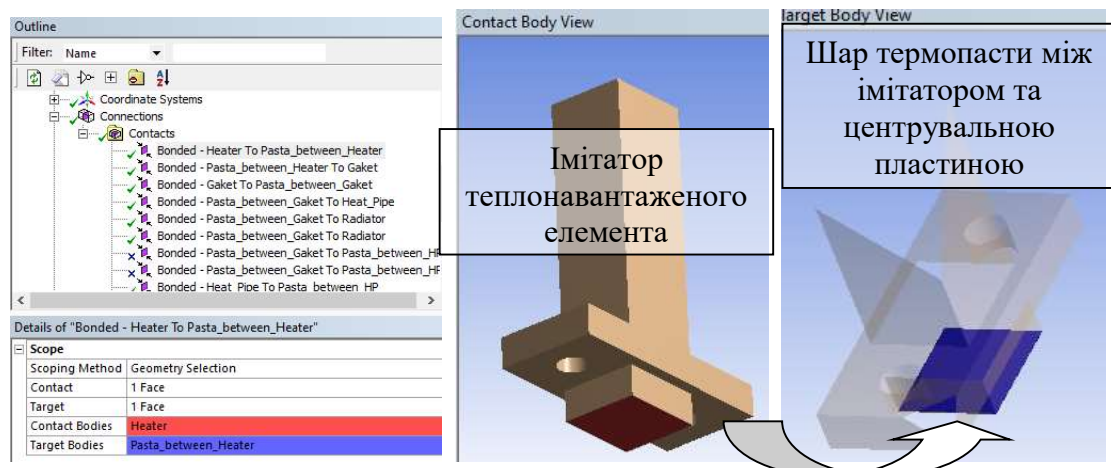


Рис. 2.6. – Приклад створення взаємозв'язку між Імітатор теплонавантаженого елемента і шаром термопасти між імітатором та центральною пластиною

Після того як створені всі контактні регіони, необхідно створити іменовані перерізи (Named Selections), з яких далі система автоматично створить граничні умови. В якості іменованих перерізів вибрати грані на вході і виході повітряного потоку в міжреберний канал радіатора (рис. 2.7а) і грань імітатора теплового навантаження до якої підводиться тепловий потік (рис. 2.7б).

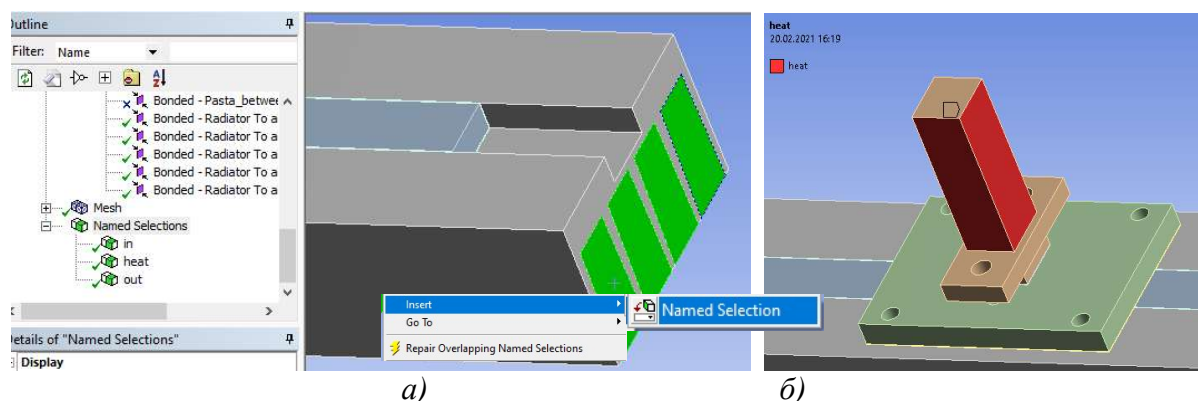




Рис. 2.7. – Іменовані перерізи входу і виходу потоку (а) та грані підводу теплового потоку (б)

Перераховані вище операції дозволяють перейти до розрахункової частини роботи. Проте не слід випускати з уваги той факт, що, зазвичай, до міжреберних каналів радіаторів охолодження РЕА поступає потік із сформованим профілем швидкості і температури. Тому, для розширення кола знань, студентам пропонується розрахувати згадані профілі шляхом моделювання течії в стабілізуючій прямокутній ділянці довжиною 500 мм, що приєднана до торця радіатора.

Для того щоб її створити, отриману модель (рис. 2.8) слід скопіювати в вікні «Project Schematic». Натиснувши праву кнопку миші на строчці «Geometry» щойно скопійованого блоку. Вибрати в випадаючому меню «New Design Modeler» і перейти до редагування моделі.

На торці радіатора, звідки планується вхід потоку, створити нову двовимірну площину Plane4  на якій створити ескіз прямокутника, що відповідає ширині  $B$  і висоті  $H$  радіатора (рис. 2.8). Щоб стало можливим відокремити перерізи на виході з стабілізуючої ділянки на вхід в міжреберний канал радіатора слід спочатку задати проекцію перерізу радіатора  Sketch1, а другим ескізом – згаданий переріз розмірами  $B \times H$ .

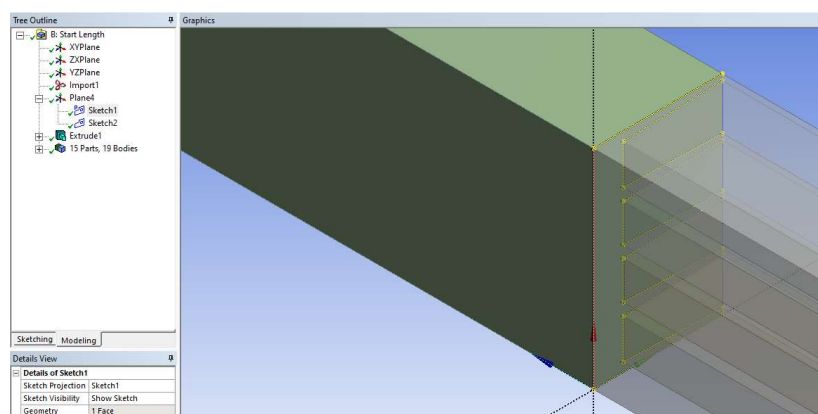



Рис. 2.8. – Створення стабілізуючої ділянки перед радіатором



Щоб створити такий ескіз потрібно на щойно створеній допоміжній площині натиснути праву кнопку миші, вибрати «Insert» і в випадаючому вікні вибрати ескіз-проекцію  (рис. 2.9).

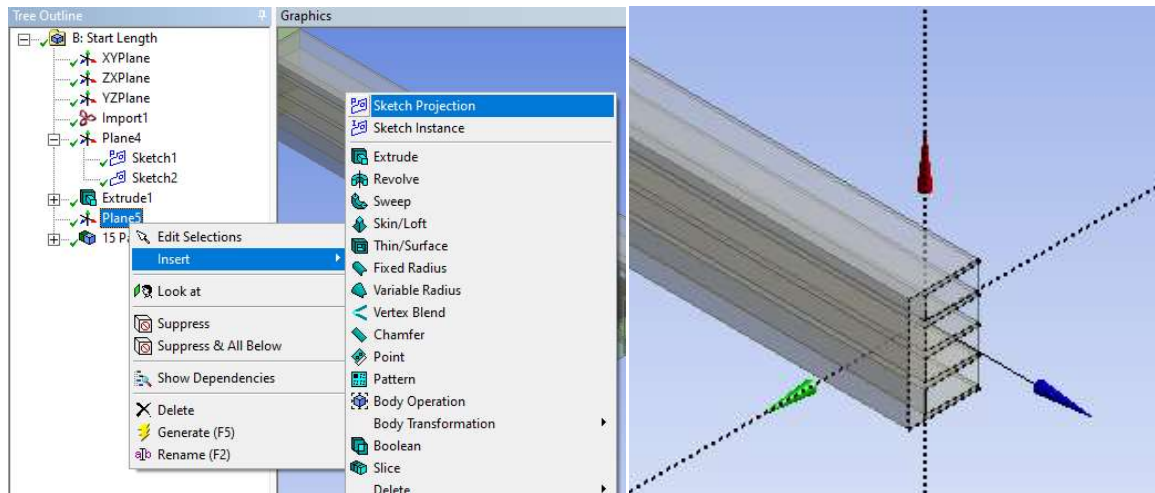


Рис. 2.9. – Створення ескізу-проекції

Скінчено-елементна сітка в стабілізуючій ділянці, яка має форму паралелепіпеда, будується за допомогою приведеної вище методики.

Застосування двох ескізів – проекції радіатора і побудованого прямокутника дозволить відокремити іменовані перерізи на виході з стабілізуючої ділянки, які будуть входними для задачі з моделлю радіатора (рис. 2.10).

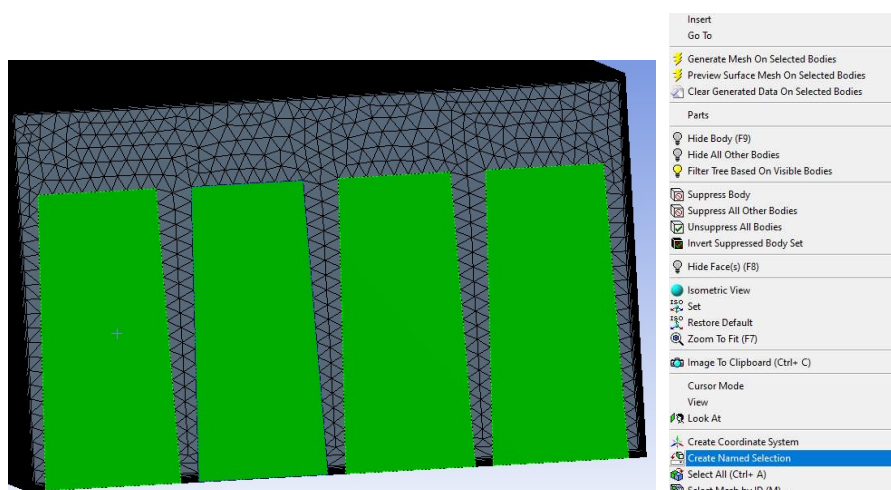
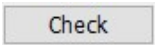
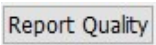


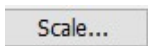
Рис. 2.10. – Створення іменованих перерізів на виході з стабілізуючої ділянки



### 2.1.1 Послідовність налаштування розрахункового комплексу Fluent для моделювання течії в стабілізуючій ділянці.

Поставлену задачу слід вирішувати в стаціонарній постановці з дотриманням вимоги досягнення незалежності рішення від щільності розрахункової сітки. В першу чергу проводиться налаштування так званого модуля Pre-processor (сукупність функцій General, Models, Materials, Cell Zone Condition та Boundary Conditions):

В меню General перевірити якість розрахункової сітки кнопками  і . Інформацію про кількість і якість форми чарунок система виводить в консоль (Console).

Кнопка  відповідає за завдання одиниць вимірювання.

В меню Models підключити розрахунок рівняння енергії (перемикач Energy перевести в положення On) та вибрати для розрахунку модель турбулентності на основі концепції вихорової в'язкості типу k-ε realizable (Viscous → k-epsilon Realizable) [6].

Відмінності Realizable k-ε model від Standard k-ε model:

- Альтернативне формулювання турбулентної в'язкості:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \text{ де } C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}}$$

де  $A_0$ ,  $A_s$ ,  $U^*$  - це функції градієнту швидкості.

- Забезпечує позитивне значення нормальних напружень  $\overline{u_j'^2} \geq 0$ .
- Забезпечує виконання нерівності Шварца:  $\overline{(u_i u_j)}^2 \leq \overline{u_i^2} \overline{u_j^2}$ .
- Містить нові транспортні рівняння для швидкості дисипації ε:

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}_{diffusion} + \underbrace{\rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon}_{Generation} - \underbrace{\rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}}_{Destruction} + \underbrace{C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b}_{Buoyancy}$$

Іншими словами, ця модель запропонувала більш обґрунтоване формулювання рівняння переносу швидкості дисипації, так як вона отримана з рівняння переносу середньої завихорюваності. А також,

при застосування цієї моделі неможливо отримати негативних значень для  $\overline{u_j'^2}$  значних деформаціях поля середньої швидкості.

Виявилося, що ця модель турбулентності описує деякі види течій краще, ніж стандартна версія. Перш за все, слід відзначити вісесиметричних затоплених струменів, розрахунок яких за стандартною моделі дає істотно більший кут розкриття, ніж спостерігається в експериментах. Використання даної моделі рекомендується для течій з великою кривизною ліній току і закручуванням течії [6]. Закручування потоку в даній задачі може спостерігатись при омиванні потоком «гострих» кромek ребра і основи радіатора.

Керуючі рівняння математичної моделі турбулентної течії, що має місце в цій задачі, і рівняння стандартної моделі турбулентності приведені в [7] і в інших підручниках з чисельних методів в гідродинаміці.

В меню Materials натиснути кнопку **Create/Edit...** для завдання залежних від температури теплофізичних властивостей повітря.

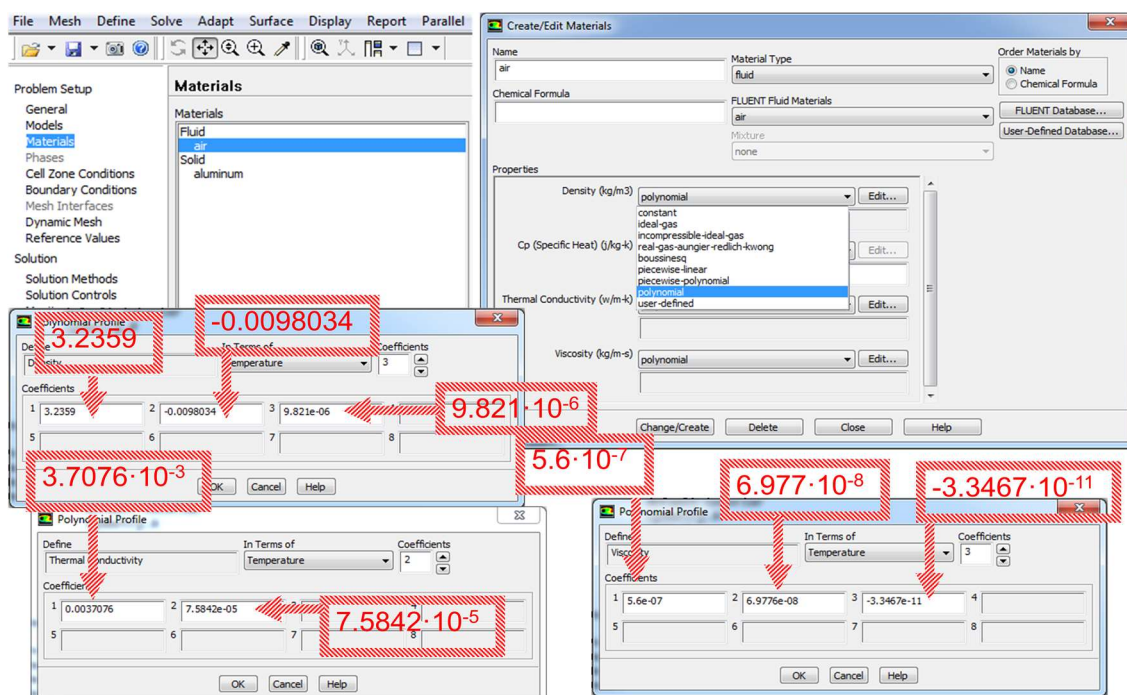
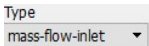
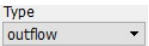
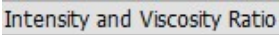



Рис. 2.11. – Завдання залежних від температури теплофізичних властивостей повітря

В меню Boundary Conditions потрібно задати об'ємну витрату згідно завдання. Зробити це можна двома способами:

- Перший спосіб. У зв'язку з тим, що безпосередньо об'ємну витрату в Fluent задати неможна, то для граничної умови «in» властивість Type перемкнути на  (масова витрата). І перерахувати масову витрату в об'ємну.

- Для граничної умови «out\_1» («out\_2», «out\_3», «out\_4») властивість Type перемкнути на  (так звані «м'які» граничні умови). При виборі Outflow система задасть питання про значення Flow Rate Weighting (яка доля від витрати потоку, що рухається в каналі полишає канал через цю граничну умову(слід ввести 1)). Для турбулентного режиму течії (група команд Turbulence строчка Specification Method) потрібно замінити  на  і вказати інтенсивність пульсацій швидкості (Turbulent Intensity) і гідравлічний діаметр каналу (Hydraulic Diameter залежить від геометрії каналу (п. 2.1.2)).

- Паралельно слід обчислити через рівняння нерозривності, яка швидкість потоку може спостерігатися в міжреберних каналах радіатора і проконтролювати її значення в меню Reference Values (рис. 2.12).

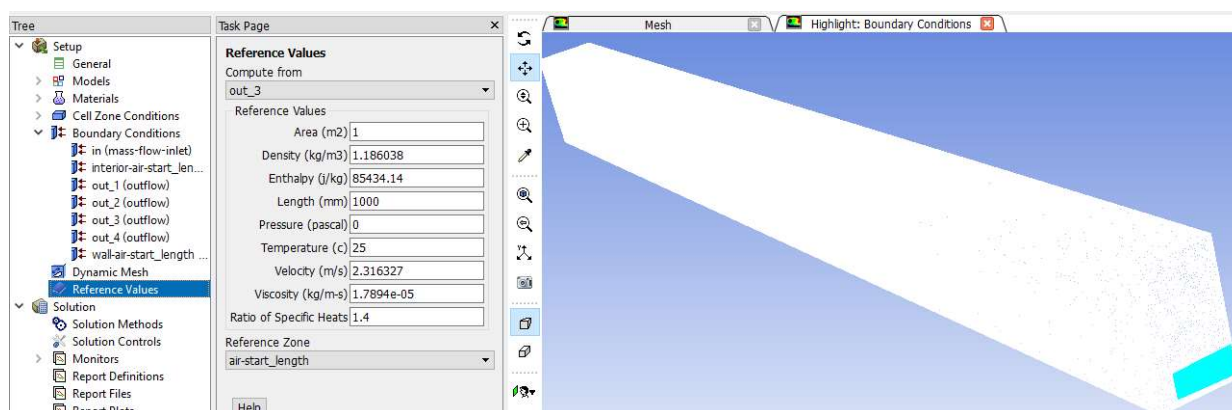


Рис. 2.12. – Меню Reference Values

Другий спосіб – задати в якості граничних умов пару «Pressure-inlet» ↔ «Pressure-outlet». Цю пару у випадку моделювання газів, якщо спостерігаються ефекти стискаємості, задавати у якості граничних умов у Fluent більш правомірно.

Згадана пара граничних умов у Fluent використовується за замовчуванням. Залишається для граничної умови «in» з Type «Pressure-inlet» підібрати таке значення надлишкового тиску (Gauge Pressure), щоб воно відповідало об’ємній витраті повітряного потоку на вході в канал і розрахунковій швидкості на виході з нього (рис. 2.12).

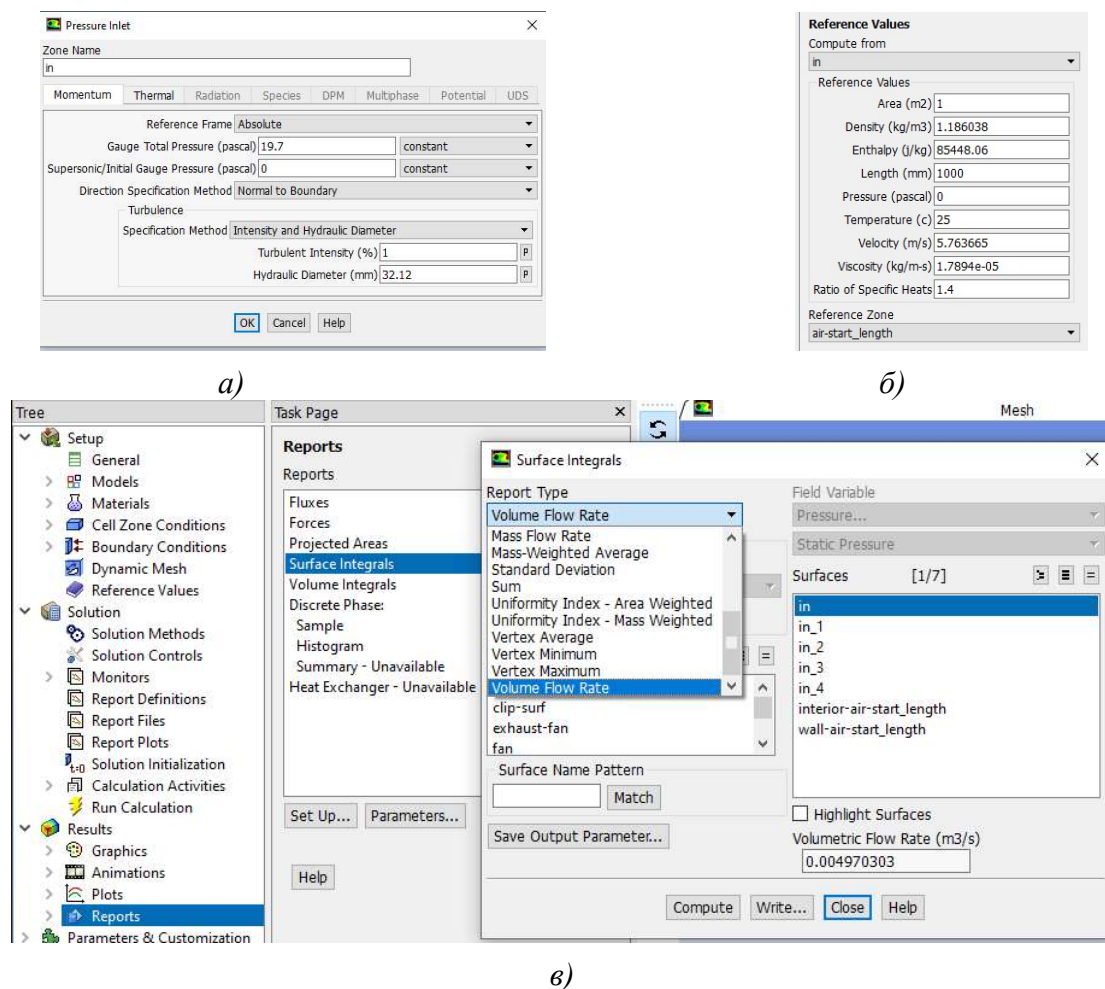



Рис. 2.12. – Налаштування граничної умови «Pressure-inlet» (а), перевірка значення швидкості потоку на вході в канал за допомогою меню Reference Values (б) та визначення об’ємної витрати теплоносія (в)

Для граничних умов «out\_1» («out\_2», «out\_3», «out\_4») у яких Type заданий «Pressure-outlet» значення надлишкового тиску Gauge Pressure залишити рівним нулю (потік направляється в атмосферу тиск якої складає 101325 Па).

Перевірка значення об'ємної витрати теплоносія на вході в канал виконується за допомогою меню Reports → Surface Integrals → Report Type → Volume Flow Rate (рис. 2.12в).

Після налаштування функцій Pre-processor потрібно провести налаштування модуля Solution (рис.2.13). Цей модуль складається з таких основних функцій як Solution Method (налаштування числових методів для моделювання), Solution Control (налаштування порядків дискретизації та вибір рівнянь для розрахунку), Monitors (завдання графічного зображення збіжності рішення і умов виходу з ітераційного циклу), Solution Initialization (завдання меж, звідки розпочинати обчислення), Run Calculation (запуск задачі на розрахунок).

При налаштування меню Solution Method (рис. 2.13) слід звернути увагу виділені блоки – Pressure-Velocity Coupling (на взаємозв'язок тиск швидкість), що характеризує алгоритм розрахунку неперервності маси при використанні послідовного вирішувача (Segregated Solver вибирається в меню General) та Spatial Discretization (інтерполяційні методи).

Блок команд Pressure-Velocity Coupling. В ANSYS-Fluent за замовчуванням пропонується алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (напівнеявний метод для рівнянь зі зв'язком по тиску). – один з найпоширеніших і найбільш стійких алгоритмів числового рішення рівнянь Нав'є-Стокса. В ANSYS-Fluent також використовуються модифікації і вдосконалення згаданого алгоритму, вибір яких стає доступним після виклику випадального меню кнопкою . Це методи PISO (Pressure implicit with splitting of

operators) і SIMPLE-C (SIMPLE-Consistent). Ці алгоритми описані у багатьох підручниках з чисельних методів в гідродинаміці [8].

Блок команд Spatial Discretization. Містить алгоритми, за допомогою яких визначені методом скінчених елементів термодинамічні параметри (що обчислюються в центрах скінчених об'ємів) повинні бути інтерпольовані на грані контрольних об'ємів. Тут, функцію визначення градієнтів обрати шляхом використання методу найменших квадратів (Least Squares Cell Based), функцію визначення тиску – за допомогою інтерполяційних методів Second-Order, що призначення для моделювання потоків в яких спостерігаються ефекти стискаємості.

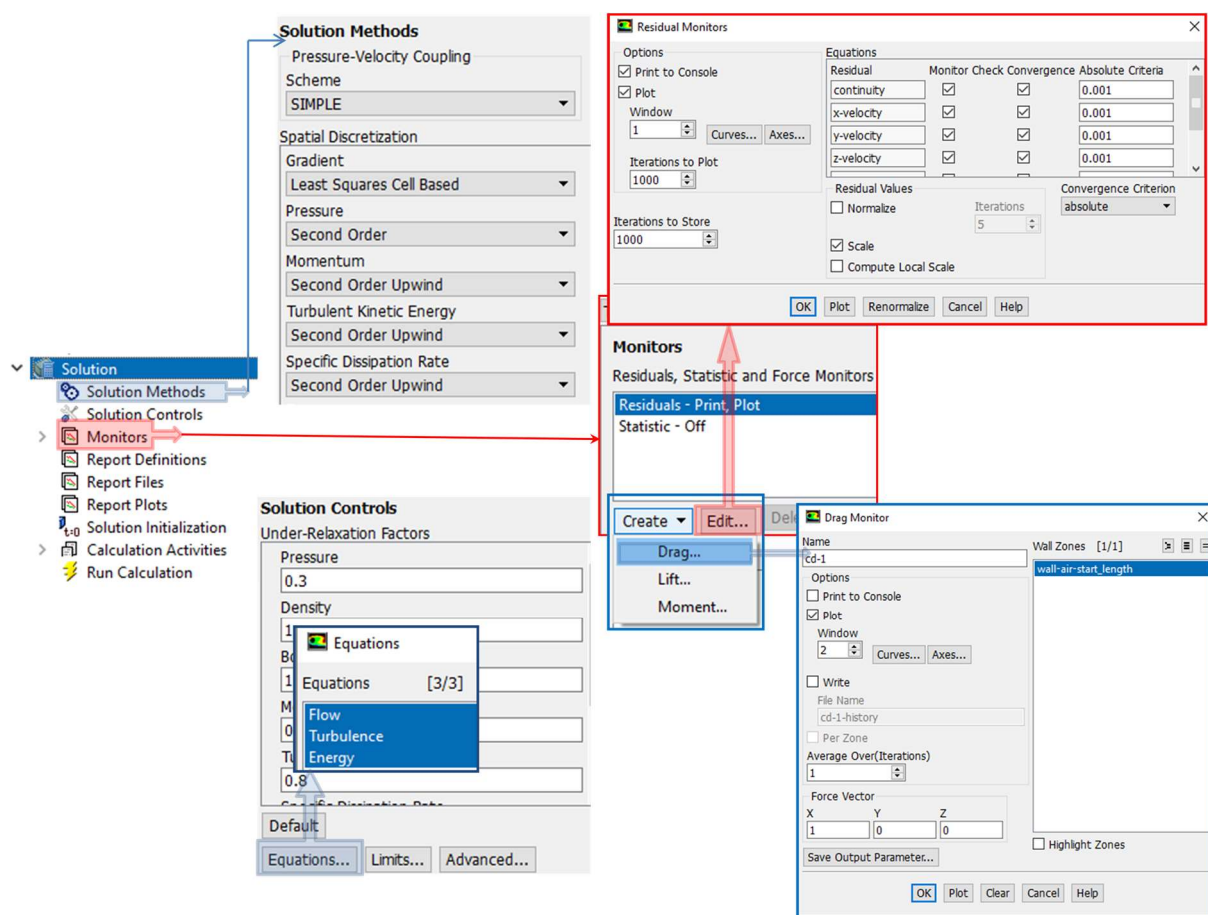




Рис. 2.13. – Налаштування граничної умови «Pressure-inlet» (а), перевірка значення



При налаштування меню Solution Control також слід враховувати, що за замовчуванням, система пропонує проводити розрахунок з застосуванням першого порядку дискретизації (First Order Upwind). Використання цього порядку дискретизації часто призводить до виникнення числової дифузії [9]. Тому слід змінити порядок дискретизації на другий з метою підвищити точність рішення (Second Order Upwind). З другим порядком дискретизації необхідно застосування меншого значення для підрелаксаційного фактора енергії (energy under-relaxation factor) для забезпечення збіжності. Підрелаксаційні фактори призначені для стабілізації ітераційного процесу. Зменшення цих факторів в окремих випадках може сприяти швидшій збіжності рішення.

Налаштування меню Monitors необхідно для завдання умов виходу з ітераційного циклу. Натиск кнопки  призведе до появи вікна Residual Monitors (рис. 2.13) де потрібно вказати критерії збіжності рішення (Convergence Criterion). Вказується як значення різниці між обчисленим на попередньому ітераційному кроці значенням підконтрольної величини та щойно розрахованим.

Додатково, можна створити монітор (натиск на кнопку ) для візуалізації коефіцієнтів моделі  $C_L$  (Lift),  $C_D$  (Drag),  $C_m$  (Moment) (рис. 2.13). Візуалізації їх розподілів відбувається стінках моделі.

Як тільки попередні налаштування проведені, потрібно виконати ініціалізацію рішення (вказати системі межу, звідки розпочинати обчислення (рис. 2.13 Solve → Initialize → Initialize...)).

Після того як отримали від системи в консолі повідомлення Solution in Converged, можна проводити візуалізацію результатів. За що відповідає модуль Post-processor (Results). Стандартний Post-processor Fluent більш складний для засвоєння ніж Post-processor ANSYS (окремо винесений блок Results), студентам пропонується результати температурних полів радіатора з тепловими трубами та без

них переглядати саме за допомогою блок Results у вікні Project Schematic ANSYS. Проте перед закриттям Fluent слід результати обчислення термодинамічних параметрів на виході із стабілізуючої ділянки записати у так званий Profile (рис. 2.14).

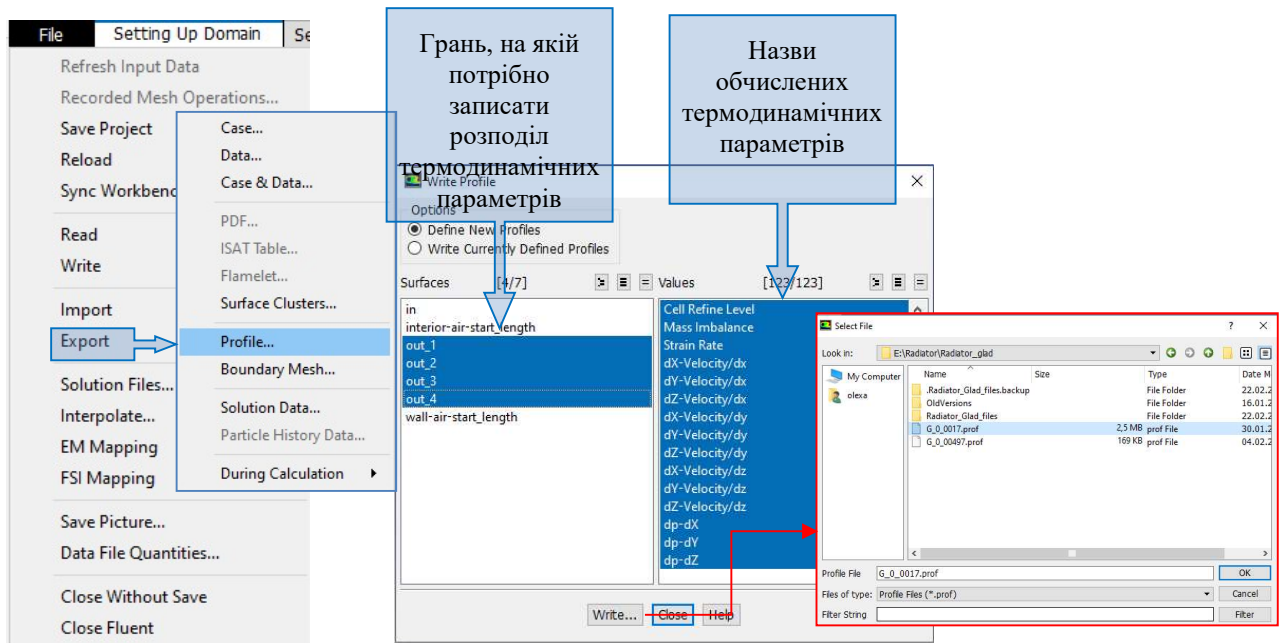



Рис. 2.14. – Запис обчислених термодинамічних параметрів у так званий Profile

## 2.1.2 Послідовність налаштування розрахункового комплексу Fluent для моделювання течії в радіаторі.

Перед проведенням числових розрахунків за допомогою пакету прикладних програм ANSYS- Fluent необхідно визначити геометричні характеристики розрахункових областей. Для їх визначення використовуються стандартні функції конструкторського програмного забезпечення, яке використовувалось для розробки тривимірної моделі радіатора. Цим програмним забезпеченням може бути, наприклад, Autodesk Inventor. Так для визначення еквівалентного діаметру каналу [10] (рис. 2.15а), сумарної площі перерізу каналів між ребрами (рис. 2.15б), площі поперечного перерізу ребра , площі орбленої поверхні  $S_{нов}$  (рис. 2.15в) що



випромінює тепловий потік, а також коефіцієнта оребрення [5], слід скористатися функцією «Вимірювання»  з лінійки «Керування» (рис. 2.15).

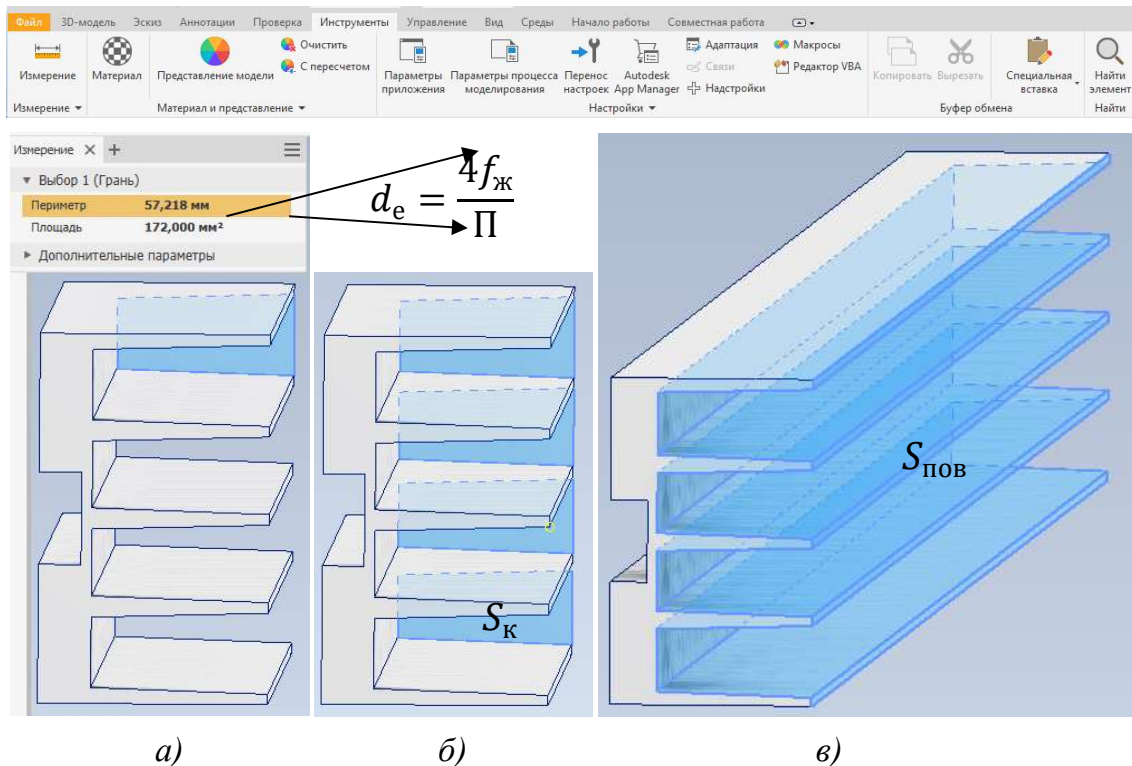
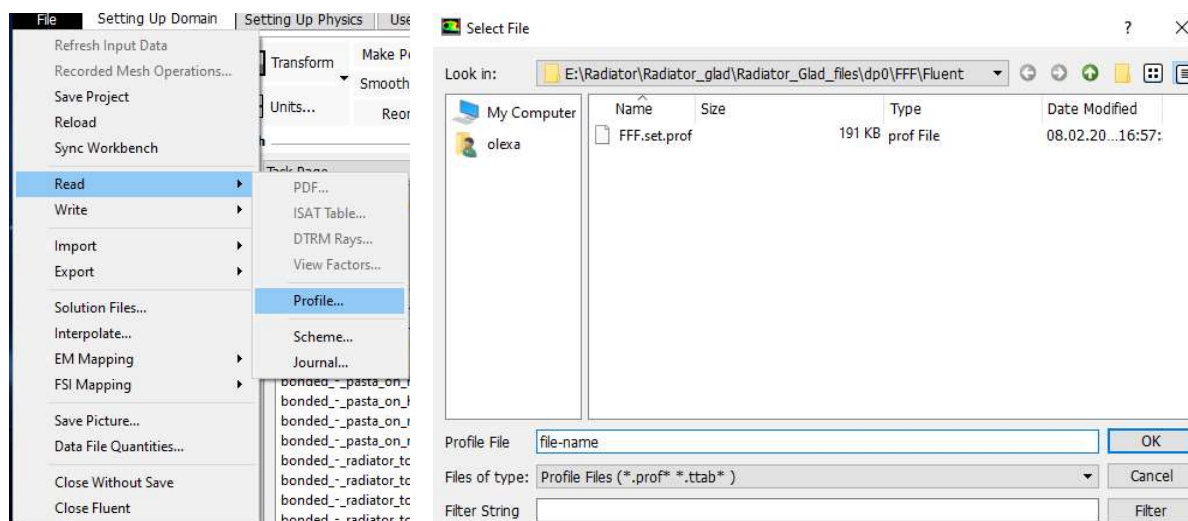


Рис. 2.15. – Визначення геометричних характеристик оребрення

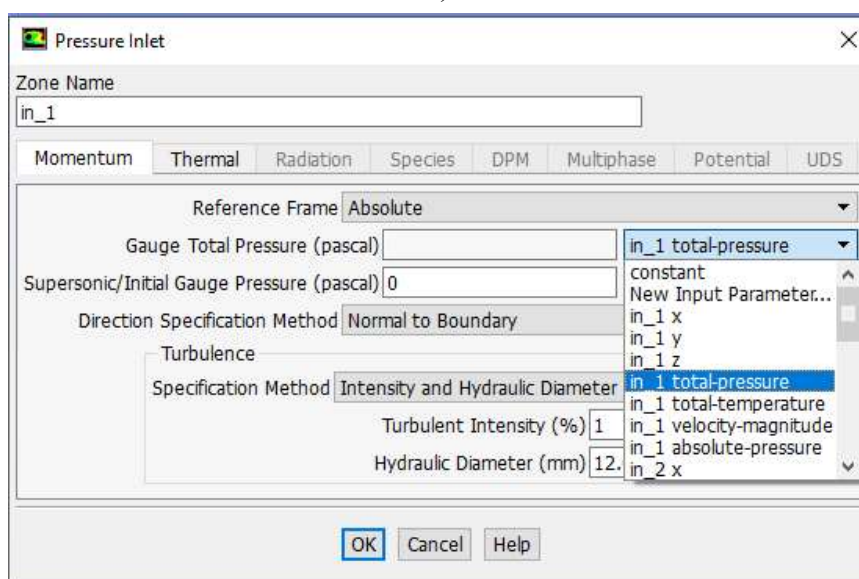
Налаштування програми Fluent для моделювання течії і теплообміну в системі «радіатор + тепла труба» виконуються в тій же послідовності, що і у випадку стабілізуючої ділянки (п. 2.1.1). Різниця лише в тому, що на перерізи, які характеризують вхід потоку в міжреберні канали радіатора потрібно поставити дані з Profile (умова продовження рішення).

Щоб виконати цю умову, потрібно у підготовленій до розрахунку задачі в Fluent, відкрити заздалегідь підготовлений Profile (текстовий файл з розширенням «\*.prof» File → Read → Profile (рис.2.16)). Перейти в меню Boundary Conditions і для граничних умов «in\_1» («in\_2», «out\_3», «in\_4»). Якщо в якості граничних умов задавали

пару «Pressure-inlet» ↔ «Pressure-outlet», то для «Pressure-inlet» при його редагуванні поряд зі строчкою де пишеться значення надлишкового тиску Gauge Pressure замінити «Constant» на «in\_1 total pressure», що вибрано з Profile (рис. 2.16).



а)



б)

Рис. 2.16. – Зчитування файлу вхідних даних (а) та застосування прочитаних розподілів термодинамічних параметрів в якості граничних умов (б)

Якщо в якості граничних умов задавали пару «mass-flow-inlet» ↔ «Outflow», для «mass-flow-inlet» при редагуванні цієї граничної

умови, поряд зі строчкою «Mass-Flow-Rate» замінити «Constant» на «in\_1 mass-flow-rate», що вибрано з Profile.

Всі інші налаштування виконати згідно п.2.1.1. За однією відмінністю в ініціалізації рішення – для стабілізуючої ділянки виконували ініціалізацію «Compute From» від одного входу, з задачі «радіатор + теплова труба» потрібно провести ініціалізацію «From All Zones», так як декілька перерізів для входу потоку.

Наступний пункт – це створення в меню Material і застосування в Cell Zone Conditions до розрахункового об'єму, що символізує теплову трубу, в нового матеріалу з теплопровідністю, що відповідає значенню ефективної теплопровідності теплової труби (рис. 2.17). Щоб його створити потрібно з бази матеріалів **Fluent Database...** скопіювати, наприклад мідь, змінити назву матеріалу і значення теплопровідності. Потім, перейти в Cell Zone Conditions і назначити домену, що відповідає за теплову трубу щойно створений матеріал.

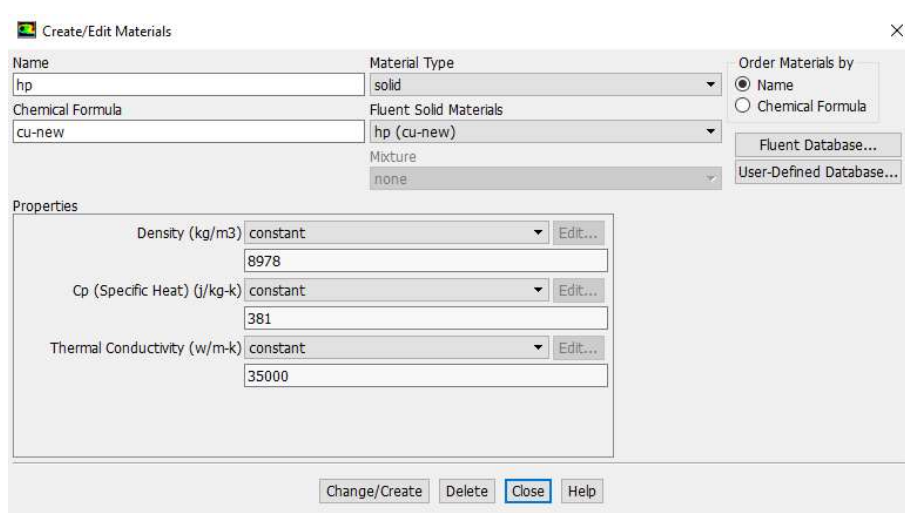


Рис. 2.17. – Створення матеріалу для теплової труби

Після завершення ітераційного процесу обчислення задачі «радіатор + теплова труба» потрібно провести обчислення задачі течії і теплообміну в радіаторі без теплової труби, що порівняти ефективність використання теплової труби.

## 3 ВКАЗІВКИ ДО ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ

### 3.1.1 Оформлення результатів моделювання.

В якості результатів моделювання слід представити розподіли температур як в поперечних перерізах радіатора так і на його поверхні. Для оформлення результатів розрахунку використати Post-Processor ANSYS – блок Results.

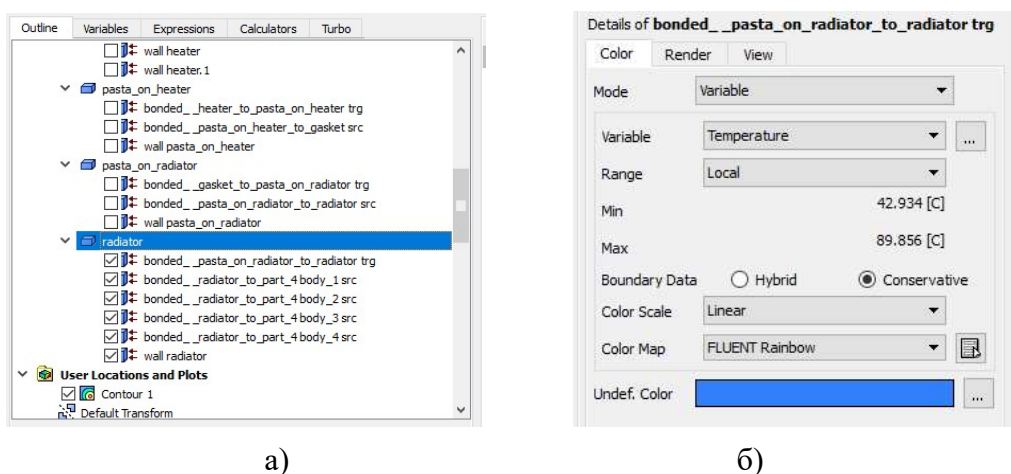


Рис. 3.1. – Вибір поверхні візуалізації температури (а) та налаштування вікна для відображення розподілу температури на поверхні (б)

Візуалізація розподілу температур можна виконати в два етапи. На першому зобразити розподіл температур радіатора в ізометрії і повернутого основою до спостерігача. На другому – ребрами до спостерігача (рис. 3.2 – 3.3). Для цього, поставити відмітку ☒ в полі Case біля назви кожної поверхні радіатора. Подвійний клік на назві поверхні активізує меню Details. Де в закладці Color у строчці Mode замінити Constant на Variable. В якості Variable вибрати Temperature. В якості зміни діапазону температур Range вибрати Local. Шкалу відображення розподілу температур змінити на Fluent Rainbow. І так для всіх поверхонь радіатора.

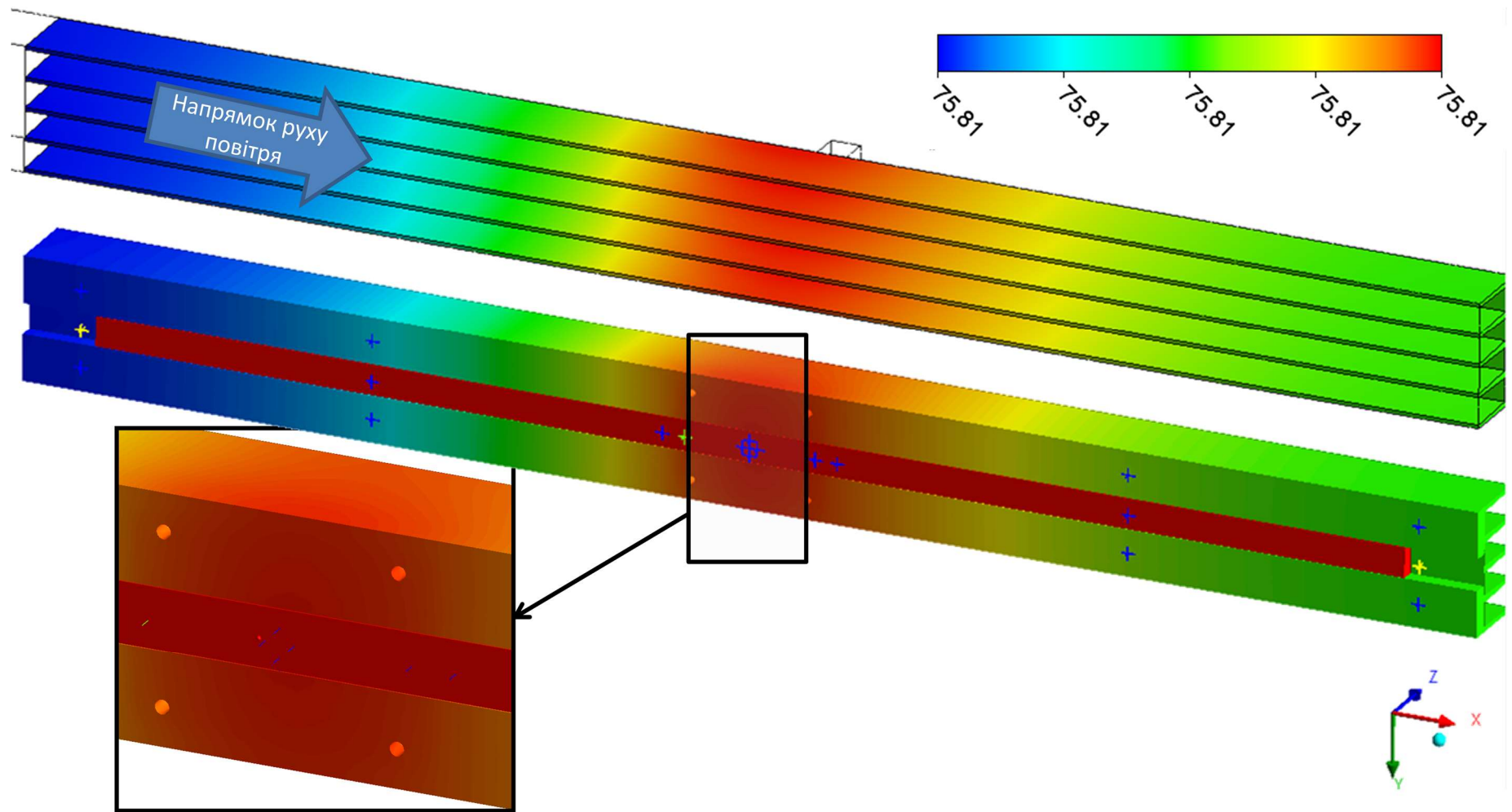


Рис. 3.2. – Результат моделювання температурного поля радіатора з тепловою трубою (теплове навантаження становить 100 Вт при об'ємній витраті на вході в канал аеродинамічної труби  $0,0015 \text{ м}^3/\text{с}$ )



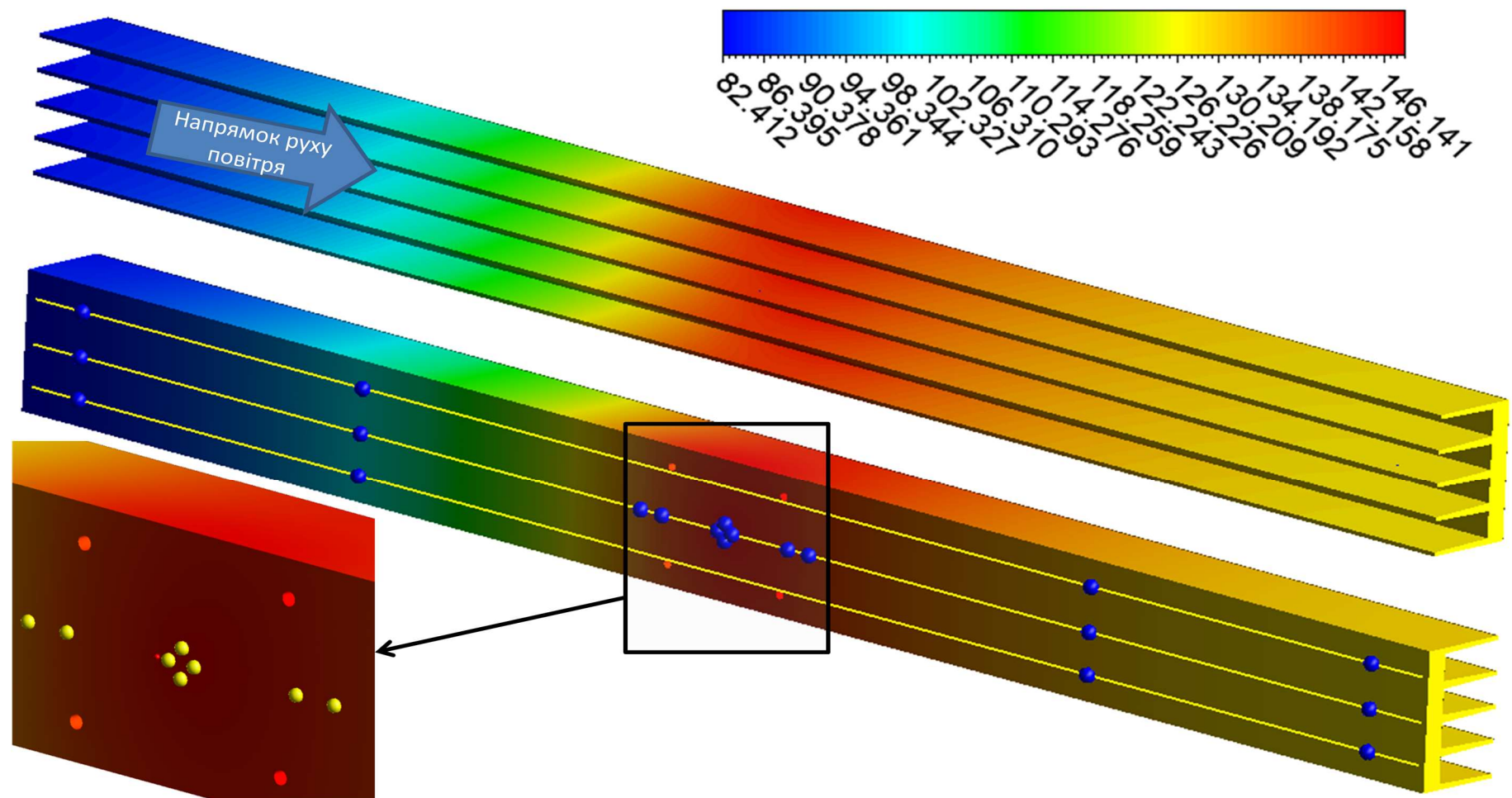



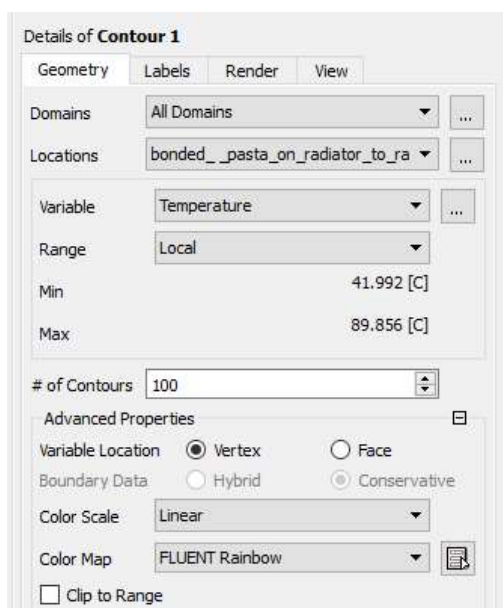
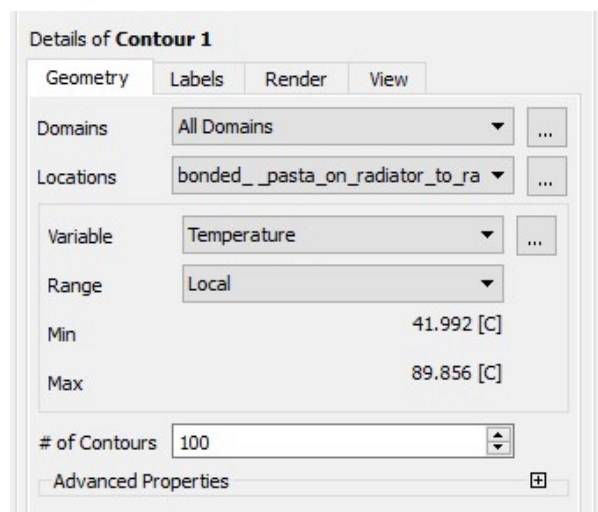


Рис. 3.3. – Результат моделювання температурного поля радіатора без теплової труби (теплове навантаження становить 100Вт при об'ємній витраті на вході в канал аеродинамічної труби 0,0015 м<sup>3</sup>/с)

У випадку, коли потрібно поряд із зображенням радіатора основою до спостерігача отримати зображення ребрами до спостерігача (тобто віддзеркалене відносно площини симетрії), потрібно створити нову локацію користувача –  Contour 1, подвійний клік на якому запустить меню Details. Де в закладці Geometry (рис. 3.4а) в строчці Location натиснути кнопку  і вибрати зі списку всі поверхні, що відносяться до радіатора. В якості Variable вибрати Temperature. В якості зміни діапазону температур Range вибрати Local. Кількість кольорів вибрати 100. Шкалу відображення розподілу температур змінити на Fluent Rainbow. Для цього розкрити сувій Advanced Properties кнопкою  і в випадаючому меню Fluent Rainbow.



а)



б)

Рис. 3.4. – Налаштування закладки Geometry (а) та View (б)

Щоб розвернути вид до спостерігача, слід перейти до закладки View (рис. 3.4б) і активізувати строчки Apply Rotation (для розвороту) і Apply Translation (для переміщення). Тим самим, вид температурного поля радіатора ребрами до спостерігача буде

розміщений під попереднім видом в одному проекті, що зручно для аналізу результатів досліджень.

Для оцінки ефективності використання теплової труби слід розділити ширину основи радіатора на три зони. По центру кожної зони побудувати двовимірні відрізки (на рис. 3.2 - 3.3 позначені жовтим кольором) за допомогою яких побудувати графічну залежність температури від довжини радіатора (рис. 3.5).

Для порівняння використати відрізки як по ширині основи так і вздовж торця центрального ребра.

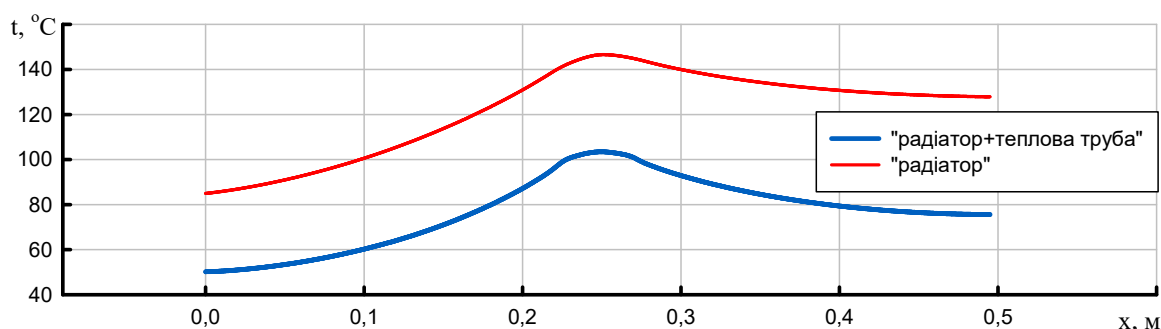



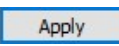
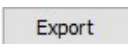


Рис. 3.5. – Порівняння результатів CFD-моделювання конструкцій радіатора з тепловою трубою та без неї. В обох задачах теплове навантаження становить 100 Вт при об'ємній витраті на вході в канал стабілізуючої ділянки становить  $0,0015 \text{ м}^3/\text{с}$

Побудову двовимірних графіків почати з створення відрізка за допомогою кнопки  Location →  Line (рис. 3.6а). Задавши координати відрізка так щоб він проходив вздовж кромки центрального ребра потрібно натиснути кнопку  (Chart) і створити двовимірний графік.

В закладці Data Series у якості кромки Location (рис. 3.6б), вздовж якої збирати дані потрібно вказати назву щойно створеної лінії (рис. 3.6а). В закладці X Axis (рис. 3.6в) у якості змінної (Variable) вказати Chart Count. В закладці Y Axis (рис. 3.6г) у якості змінної (Variable) вказати Temperature. Натиснути на кнопки  Apply і  Export, щоб експортувати дані в Microsoft Excel у вигляді текстового файлу для



подальшого налаштування графіку до вигляду, який прийнятний до аналізу (рис. 3.5).

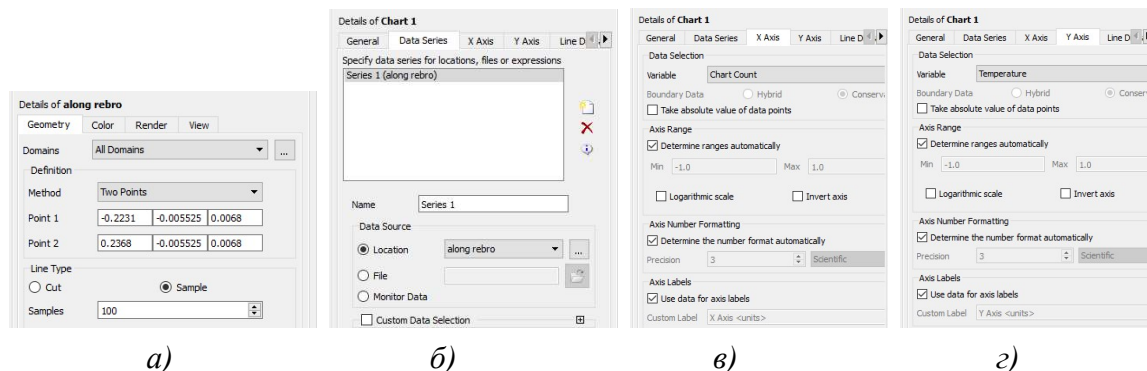


Рис. 3.6. – Приклад створення двовимірного відрізка вздовж ребра (а), та налаштування закладок Data Series (б), X Axis (в), Y Axis (г)

Графіки вздовж інших перерізів створюються аналогічно.

Для того щоб перевірити якість отриманих результатів бажано отримати незалежність рішення від щільності розрахункової сітки (п. 2.1). З цією метою, в модулі Mesh потрібно зменшити (або збільшити) відстань між вузлами скінчено-елементної сітки в результаті чого збільшиться (або зменшиться) кількість скінчених елементів. Потім провести аналогічні розрахунки і порівняти отримані результати (рис. 3.7). коректною буде та щільність розрахункової сітки (оцінюється в строчці (Statistic меню Mesh) при якій значення розподілів температури не змінюються.

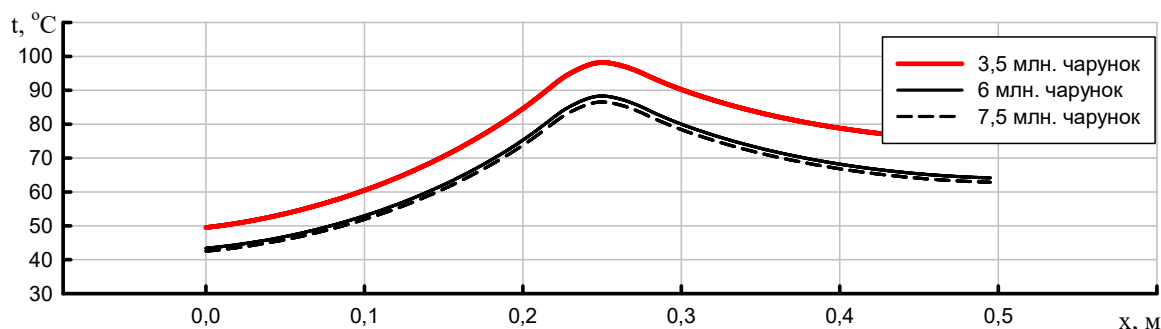


Рис. 3.7. – Залежність температури вздовж довжини радіатора для різних значень щільності розрахункової сітки для випадку коли теплове навантаження становить 100 Вт при об'ємній витраті на вході в канал стабілізуючої ділянки становить 0,005 м<sup>3</sup>/с.

З метою визначення коефіцієнту ефективності oreбрення потрібно провести візуалізацію (рис. 3.8) розподілу локальних коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні ребер. Візуалізація виконується на поверхні розділу між твердотільною поверхнею радіатора і доменом, що символізує рухомий потік повітря (тобто знайти як ці грані називаються в списку доступних граничних умов, (см. рис. 3.8) і провести на них візуалізацію Wall Heat Transfer Coefficient – локальний коефіцієнт тепловіддачі). Для подальших розрахунків це значення потрібно осереднити по поверхні: Reports → Surface Integral → Area Weighted Average → Wall Fluxes... → Wall Func. Heat Tran. Coef.

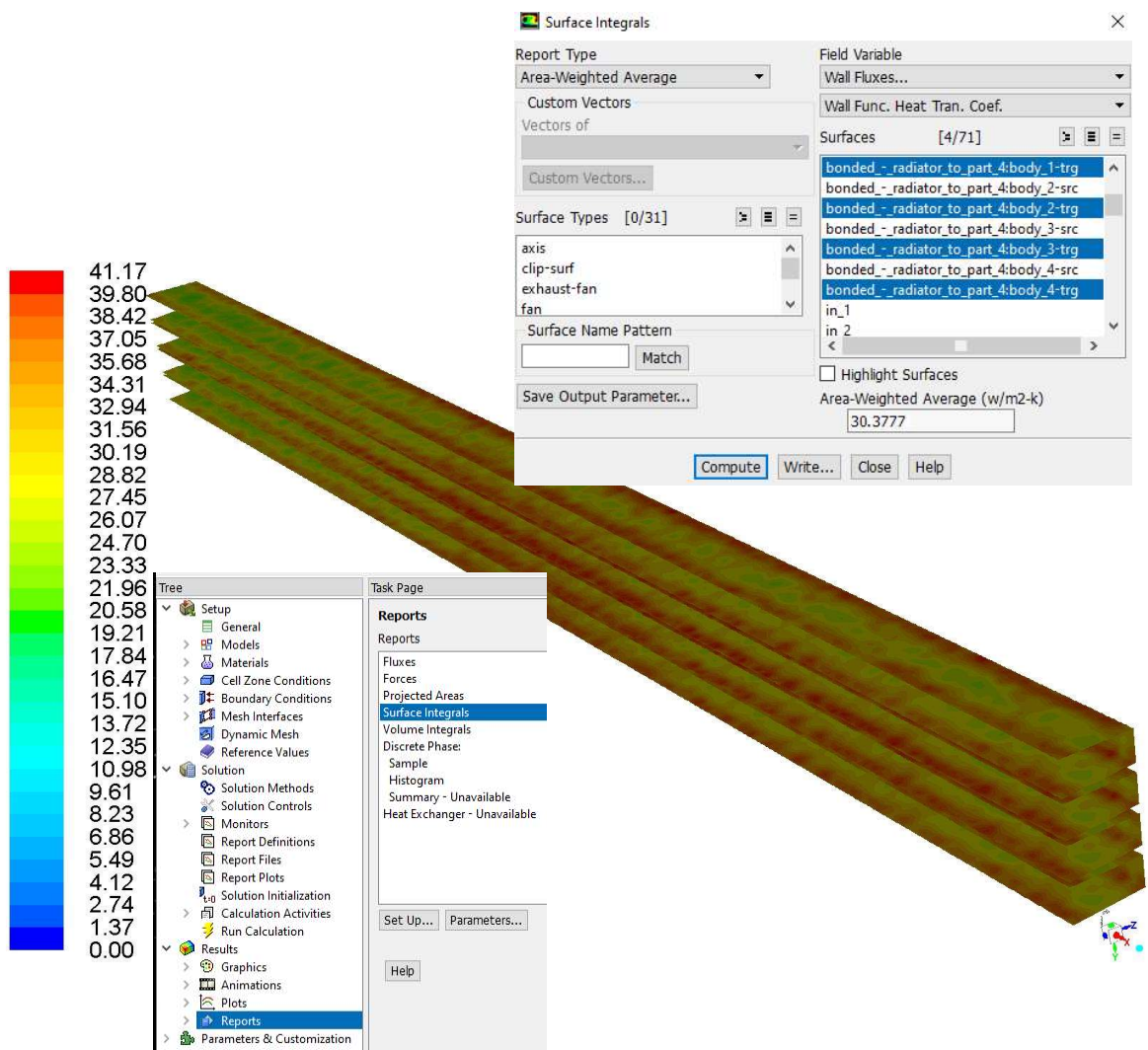


Рис. 3.8. – Візуалізація локальних коефіцієнтів тепловіддачі

Алгебраїчне осереднення даних графічної залежності, зображеної на рис. 3.5 дозволить отримати середню температуру торця ребра. Температуру основи визначають таким же способом [11].

Температура торця ребра визначається за допомогою залежності:

$$\vartheta_p = \vartheta_{\text{осн}} \frac{I_0(2\sqrt{Z_2})K_1(2\sqrt{Z_2}) + I_1(2\sqrt{Z_2})K_0(2\sqrt{Z_2})}{I_0(2\sqrt{Z_1})K_1(2\sqrt{Z_2}) + I_1(2\sqrt{Z_2})K_0(2\sqrt{Z_1})}$$

де  $\vartheta_p$  – надлишкова температура ребра ( $\vartheta_p = \vartheta_2 + t_{\text{осн}}$ ), °C;  $\vartheta_{\text{осн}}$  – надлишкова температура основи ребра ( $\vartheta_{\text{осн}} = t_{\text{осн}} - t_{\text{пов}}$ ), °C;

$$Z_1 = \frac{\alpha}{\lambda \tan \varphi} x_1; Z_{21} = \frac{\alpha}{\lambda \tan \varphi} x_2$$

де  $\alpha$  – середній коефіцієнт тепловіддачі (рис. 3.8), Вт/(м²·K);  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу ребра, Вт/(м·K);  $x_1$  і  $x_2$  – геометричні координати (рис. 3.9),  $\varphi$  – кут, рад;  $I_0(\dots)$  і  $I_1(\dots)$  – модифіковані функції Бесселя першого роду нульового і першого порядків;  $K_0(\dots)$  і  $K_1(\dots)$  – модифіковані функції Бесселя другого роду нульового і першого порядків.

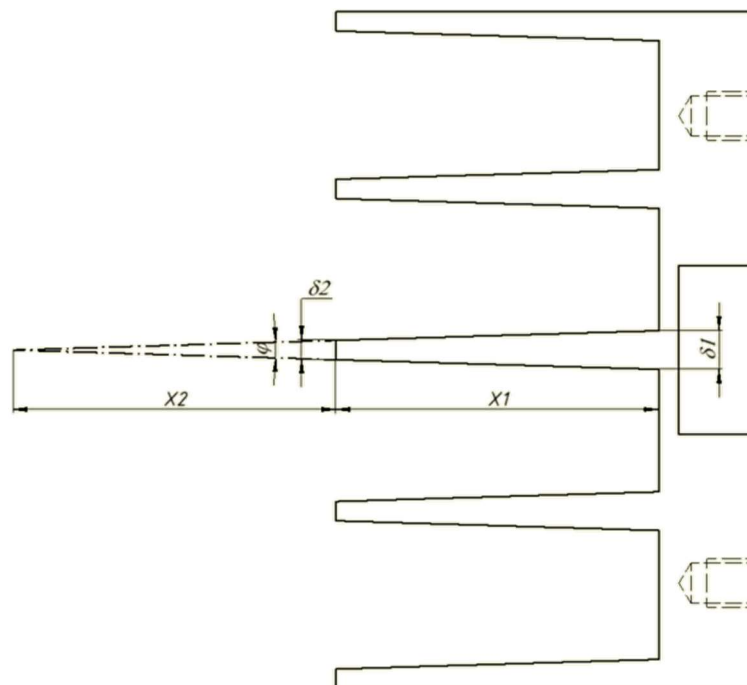


Рис. 3.9. – До визначення температури торця ребра

Значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі отриманих засобами CFD-моделювання порівняти із результатами аналітичних розрахунків (п. 3.1.2).

Ефективність ребра призматичної форми визначається за допомогою наступної залежності [12]:

$$E = \frac{I_1(2mH)}{mH \cdot I_0(2mH)}$$

Параметр ребра  $m$  визначається за формулою:

$$m = \left( \frac{2\alpha}{\lambda \delta_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Результат обчислення розподілу температури в товщі ребра за теоретичною залежністю:

$$\vartheta = \frac{\vartheta_{\text{очн}} I_0(2m\sqrt{Hx_1})}{I_0(2mH)}$$

повинен співпадати з графічною залежністю розподілу температури в товщі ребра, що отримана шляхом CFD-моделювання (рис. 3.10).

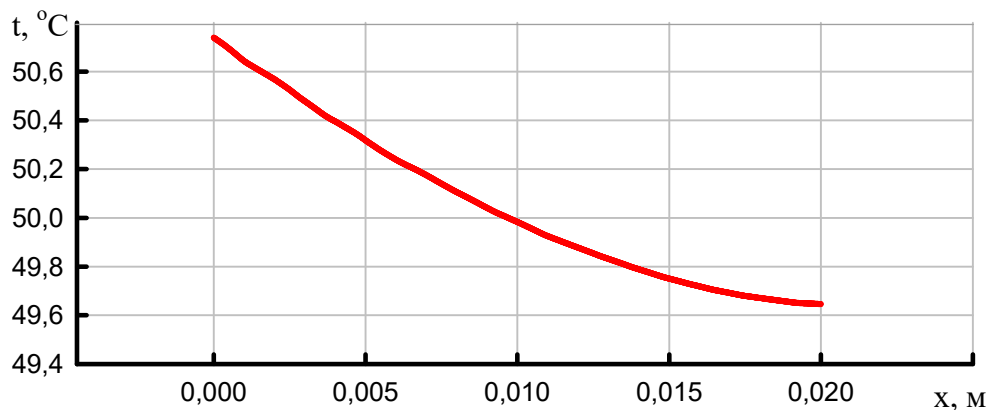


Рис. 3.10. – Результат CFD-моделювання розподілу температури в товщині ребра

### 3.1.2 Вказівки до виконання аналітичних розрахунків.

Після того, як визначені геометричні характеристики оребрнення радіатора, слід задатися середньою температурою його основи  $\theta_{\text{осн}}^{(1)}$ , яку визначають шляхом поступового наближення. Цю величину, що обчислюється в процесі розрахунку слід порівнювати з граничною температурою кристалу  $\theta_{\text{гран}}$ , досягнення якої посприяє збою в роботі напівпровідникового пристрою. Для германієвих напівпровідникових пристроїв вона не перевищує 85 °С.

Так як пристрій, температурний режим якого моделюється, працює діапазоні температур при якому спостерігаються як «комфортні умови робити» так і робота при максимальних теплових навантаженнях, тому для розрахунків слід задати діапазон зміни температур основи радіатора. Наприклад від 50 до 100 °С. Цьому діапазону відповідають температури перегріву ребра (якщо дивитися в першому наближенні то температури основи) відносно навколишнього середовища:

$$\vartheta_p^{(1)} = \theta_{\text{осн}}^{(1)} - \theta_c$$

Наступний крок – визначення середньобалансової температури за якою обчислюються теплофізичні властивості повітряного потоку:

$$\vartheta_6 = \theta_c + \frac{Q}{2 \cdot \rho S_k w \overline{C_p}}$$

де  $S_k$  – сумарна площа перерізу каналів між ребрами, м<sup>2</sup>;  $w$  – швидкість потоку повітря в каналах між ребрами (рис. 3.11), м/с;  $\rho$  і  $\overline{C_p}$  – густина повітря і його ізобарна теплоємність відповідно. Ці значення визначаються в першому наближенні в залежності від середньої температури теплоносія між входом і виходом потоку в міжреберний канал. При подальших ітераціях обчислюються за допомогою середньобалансової температури.

Для подальшого розрахунку потрібно в залежності від середньо балансової температури визначити по таблицям теплофізичних властивостей повітря [13] ізобарну теплоємність  $\overline{C_p}$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , кінематичний коефіцієнт в'язкості  $\nu$  та число Прандтля. А також число Прандтля при температурі основи радіатора  $\theta_p$ .

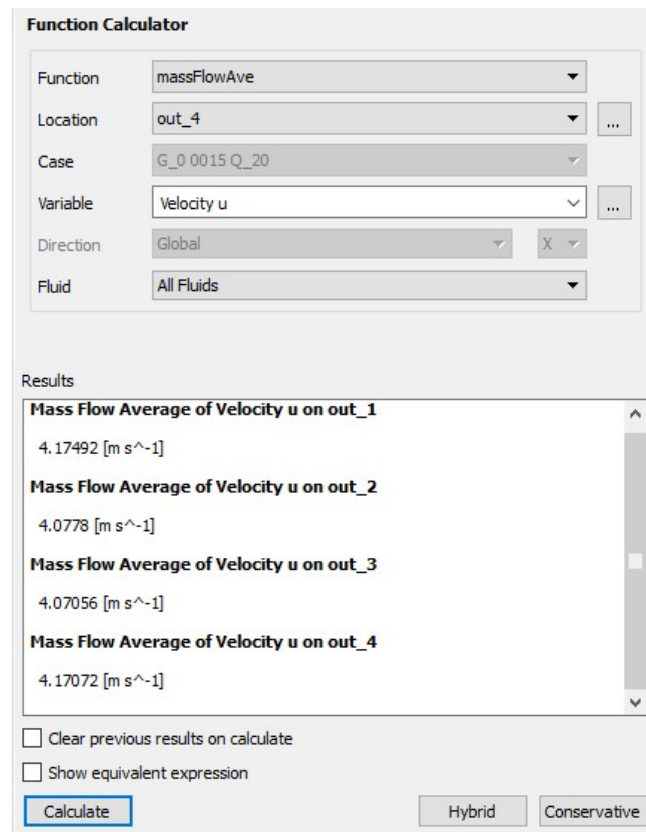


Рис. 3.11. – Визначення швидкості потоку в каналі

Далі, слід розрахувати число Рейнольдса:

$$Re = \frac{w d_e}{\nu}$$

Розрахунку конвективних коефіцієнтів тепловіддачі можна проводити за залежністю [14]:

$$Nu_{d_e} = K_0 Pr_p^{0,43} (Pr_p / Pr_{ст})^{0,25}$$

де

$$K_0 = (16,753 \ln(\text{Re}) - 123,55)$$

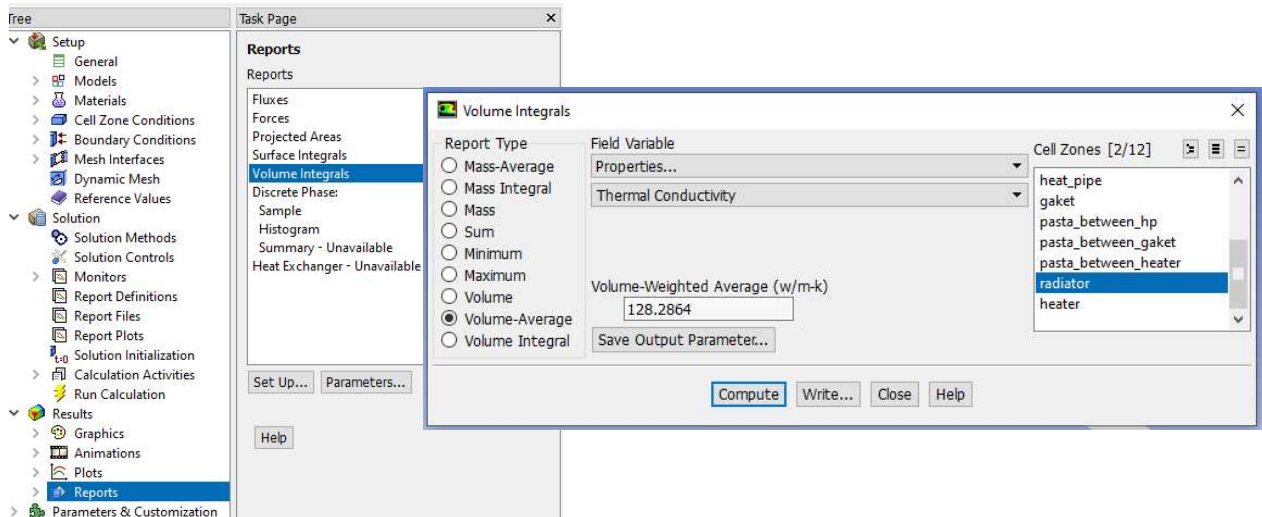
Потім проводиться визначення коефіцієнту ефективності ребра:

$$E = \frac{\tanh(mH)}{mH}$$

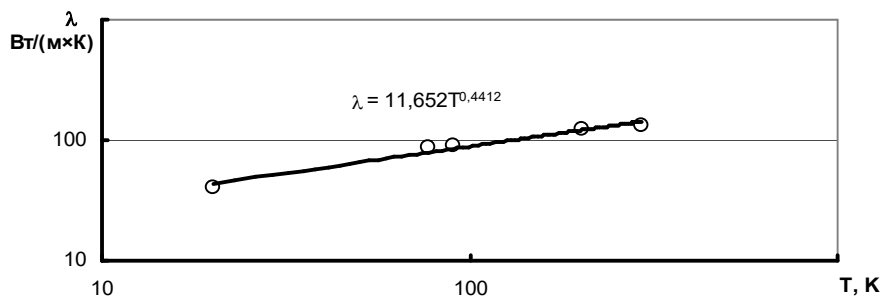
де  $m$  – параметр ребра, який визначається за допомогою формули:

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_K}{\lambda_M \delta}}$$

де  $\lambda_M$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, з якого виготовлене ребро, може бути визначений засобами ANSYS-Fluent (рис. 3.12а) або за допомогою графічної залежності коефіцієнту теплопровідності алюмінію марки АД31 від температури (рис. 3.12б).



а)



б)

Рис. 2.3. – Визначення теплопровідності матеріалу радіатора при заданій температурі: засобами ANSYS-Fluent (а) та за допомогою графічної залежності (б)

Після цього, уточнюється середня температура ребра радіатора:

$$\vartheta_p^{(2)} = \vartheta_6 + (\theta_{\text{осн}}^{(1)} - \vartheta_6)E$$

Далі, необхідно уточнити температуру перегріву основи відносно оточуючого середовища:

$$\theta_{\text{осн}}^{(2)} = \vartheta_p^{(2)} - \theta_c$$

Якщо температури  $\theta_{\text{осн}}^{(1)}$  і  $\theta_{\text{осн}}^{(2)}$  співпадають, то ітераційний цикл можна завершити, якщо ні – то значення  $\theta_{\text{осн}}^{(1)}$  слід замінити значенням  $\theta_{\text{осн}}^{(2)}$  і цикл повторити.

Після цього, в першому наближенні знаходиться кількість теплоти, що відводиться конвекцією з ребер радіатора:

$$Q_k = \alpha_k / (S_{\text{пов}} \theta_{\text{осн}}^{(N)})$$

Значення кількості теплоти, що відводиться конвекцією з ребер радіатора слід визначити як при уточненій температурі основи радіатора при якій спостерігаються «комфортні умови роботи» так і при температурі, яка відповідає максимальним тепловим навантаженням.

Далі потрібно побудувати графік теплової характеристика розрахункового радіатора в залежності від згаданих граничних температур. І за його допомогою визначити середню температуру основи радіатора.

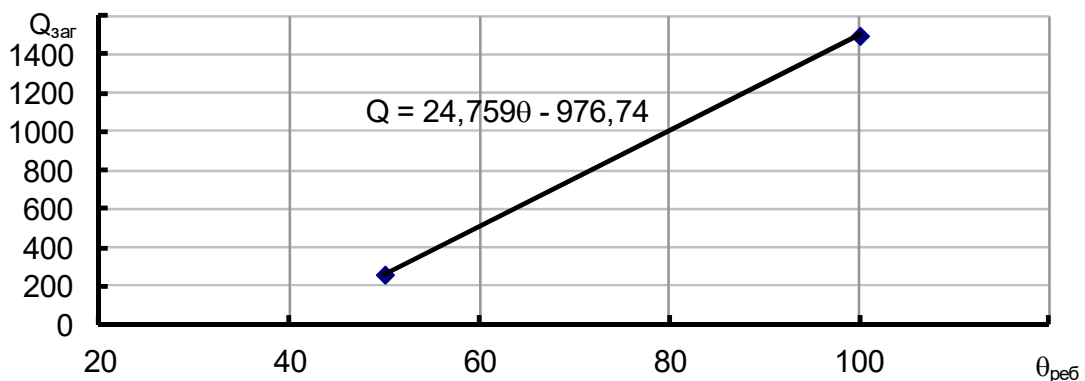


Рис. 3.13. – Уточнення температури основи радіатора



Пояснювальна записка до розрахунково-графічної роботи повинна бути оформлена згідно з вимогами, встановленими в документі ГОСТ 2.105-95 Межгосударственный стандарт ЕСКД. Общие требования к текстовым документам (введ.1996.07.01 замість ГОСТ 2.105-79) [15].

Текст пояснювальної записки повинен бути розділений на структурні елементи (“Зміст”, “Вступ”, ”Висновки”, ”Список літератури” тощо) і оформлений на аркушах формату А4 (210x297) за допомогою комп’ютерної техніки на одному боці аркуша білого паперу. Пояснювальна записка повинна містити рисунки (схеми, ескізи), що ілюструють зміст і розрахунки.

В кінці текстового документа допускається наводити список літератури, яка була використана при його складанні. Оформлення списку і посилання на нього в тексті – згідно ГОСТ 7.1.2006. Список літератури включають у зміст документа [16].

### Перелік посилань:

1. Роткоп Л. Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА / Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный. – М.:Сов. Радио, 1976. – 232с
2. P. Teerstra, M. M. Yovanovich, J. R. Culham. Analytical forced convection modeling of plate fin heat sinks. Journal of Electronics Manufacturing, Vol. 10, No. 4, (2000), 253-261.
3. Pis'mennyi, E.N., Terekh, A.M., Rogachev, V.A., Burlei, V.D., Rudenko, A.I. Calculation of convective heat transfer of plane surfaces with wire-net finning immersed in a cross-flow. Heat Transfer Research 2005, 36(1-2), с. 39-46.
4. Дульнев Г. Н. Методы расчёта теплового режима прибора / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфёнов, А. В. Сигалов. - М. : Радио и связь, 1990. - 312 с.
5. Елагин А.А., Шишкин Р.А., Баранов М.В., Бекетов А.Р., Стоянов О.В., обзор теплопроводных материалов и термопаст на их основе // Вестник Казанского технологического университета. Химия, технология и использование полимеров. – 2013. – С.132-136.
6. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во: Политехн. ун-та, 2009. — 143 с.
7. Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A New  $k-\epsilon$  EddyViscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows — Model Development and Validation // Computers and Fluids. 1995. Vol. 24, No 3. P. 227–238.
8. Ferziger, J.H., Peric, M. Computational methods fluid dynamics. Berlin: Springer, 2001. – 423 p.

9. *Ши Д.* Численные методы в задачах теплообмена. – М.: «Мир», 1988. – 544 с.

10. Чернышев А.А. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / А.А. Чернышев, В.И. Иванов, А.И. Аксенов, Д.Н. Глушкова – М. Энергия, 1989 – 216 с.

11. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: Учеб. Пособие для вузов – 4 изд., перераб. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.

12. Керн Д. и Краус А. Развитые поверхности теплообмена. Пер. с англ. М., «Энергия», 1977. – 464 с.

13. Варгафтик Н.Б., Филлипов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. – М.: Энергоатом издат, 1990. – 352 с.

14. Недужий И.А., Алабовский А.Н. Техническая термодинаміка и теплопередача: Учеб. Пособие для вузов – 2 изд., перераб. – Київ: Вища Школа, 1981. – 248 с.

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ..	4
1.1 Завдання на розрахунково-графічну роботу .....	5
2 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ .....	8
2.1 Методика CFD-моделювання радіатора .....	8
2.1.1 Послідовність налаштування розрахункового комплексу Fluent для моделювання течії в стабілізуючій ділянці.....	17
2.1.2 Послідовність налаштування розрахункового комплексу Fluent для моделювання течії в радіаторі. ....	24
3 ВКАЗІВКИ ДО ПОРІВНЯНЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ .....	28
3.1.1 Оформлення результатів моделювання. ....	28
3.1.2 Вказівки до виконання аналітичних розрахунків.....	37
Перелік посилань: .....	42